

MODELOS DE ALERTA DE CHEIAS EM OBRA

APLICAÇÃO AO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE FRIDÃO

VÍTOR JOEL MARTINS CARVALHO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Rodrigo Jorge de Oliveira Maia

Coorientador: Engenheira Ana Catarina Canelas Taveira Alves Ferreira
(EDP)

JUNHO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais

“A persistência é o maior caminho para o êxito.”

Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

No desenvolvimento desta dissertação foram várias as pessoas que me ajudaram e às quais aqui pretendo exprimir o meu agradecimento.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Rodrigo Maia pela orientação prestada, conhecimentos transmitidos

À Eng^a Ana Catarina Ferreira, agradeço por todo o tempo disponibilizado na realização desta dissertação, pelos conhecimentos transmitidos que foram fundamentais, pela paciência que teve para me incentivar e a ajudar a ultrapassar momentos de maior dificuldade, demonstrando sempre uma enorme capacidade de compreensão e simpatia.

À EDP Produção pela oportunidade de realizar esta dissertação em ambiente empresarial, que me permitiu desenvolver um conjunto de aptidões e competências técnicas e sociais. A todos os elementos da mesma, sobretudo, ao Vasco Rodrigues e à Elisabete Bertolo por toda a ajuda disponibilizada e pelo conhecimento transmitido.

À D. Esmeralda Miguel por toda a ajuda e preocupação demonstrada ao longo deste último ano.

Um especial agradecimento à minha família por ter me sempre apoiado incondicionalmente, pela confiança e incentivo demonstrado ao longo destes anos.

À minha namorada, Inês Lobo, por toda a paciência, preocupação, dedicação e carinho demonstrado. Agradeço-lhe por me guiar sempre para o caminho certo e por todo o apoio incondicional.

Ao meu melhor amigo e companheiro de casa, João Miranda, um obrigado especial por todos os momentos passados, bons ou maus, por todas as conversas incentivadoras e, principalmente, pela amizade demonstrada ao longo deste percurso.

Ao Tiago Pereira e Jonathan Espindola, por todo o companheirismo mostrado nestes anos em que partilhamos casa, por todas as experiências vividas e pela ajuda recebida.

Ao Francisco Ferraz, Miguel Almeida, Amílcar Martins e Hugo Serafim, por toda a amizade mantida ao longo destes últimos anos, pela boa disposição e pelos momentos e experiências partilhadas.

Aos meus colegas de faculdade, Rui Rocha, Pedro Tomé, José Correia e Pedro Carneiro, pela companhia nas tardes e noites de estudo.

Por fim, quero agradecer a todas as pessoas que não mencionei e que, direta ou indiretamente, me acompanharam e ajudaram no meu percurso académico.

Um muito obrigado a todos.

RESUMO

As cheias são os fenômenos naturais com grande poder destrutivo que acontecem de forma espontânea e por vezes inesperada. De modo a prever esses fenômenos, entidades públicas e privadas têm vindo a desenvolver e implementar sistemas de alerta de cheias baseados na previsão meteorológica e hidrológica.

A EDP Produção tem explorado esse tipo de sistemas no decorrer da execução dos seus aproveitamentos hidroelétricos. A prevenção de situações de emergência de cheia em obra passa pela existência de sistemas de monitorização, alerta e aviso da ocorrência desse fenómeno natural.

Nesse sentido, o trabalho realizado nesta dissertação dedica-se ao desenvolvimento de modelos de alerta de cheias em obra capazes de prever essas situações, permitindo a atuação atempada das entidades intervenientes de modo a garantir a proteção de bens materiais e ambientais.

Para a sua definição recorreu-se a uma análise e tratamento de dados de estações hidrométricas da bacia em estudo e a um modelo numérico de precipitação/escoamento, utilizando como ferramenta um *software* de modelação hidrológica.

Este documento tem por objeto de estudo o aproveitamento hidroelétrico de Fridão concessionado à EDP Produção, previsto a realizar no âmbito do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico, estando integrado na bacia do rio Tâmega.

É ainda realizado uma análise dos resultados obtidos na aplicação do modelo numérico de precipitação/escoamento recorrendo à modelação hidrológica. Os resultados obtidos permitiram desenvolver um modelo de alerta de cheias capaz de antecipar de forma eficaz e fiável a ocorrência de eventos de cheia.

PALAVRAS-CHAVE: Rede hidrometeorológica, cheias, modelação, alerta, teletransmissão.

ABSTRACT

The floods are natural phenomena with great destructive power that happen spontaneously and sometimes unexpectedly. In order to predict these phenomena, public and private entities have been developing and implementing flood warning systems based on meteorological and hydrological forecasting.

The "EDP Produção" has been exploring these types of systems during the execution of its hydroelectric plants. The prevention of flood emergencies on site involves the existence of monitoring and warning systems of the occurrence of this natural phenomenon.

Therefore, the work carried out in this dissertation is dedicated to the development of warning models of floods, in work situations, capable of predicting these situations, allowing the timely action of the intervening entities in order to guarantee the protection of material and environmental assets.

For its definition, analyzes and data treatment of hydrometric stations of the basin under study and a numerical model of precipitation/runoff were studied. A hydrological modeling software was used as a tool.

The purpose of this document is the hydroelectric exploitation of Fridão concessioned to the "EDP Produção", planned to be carried out under the "Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico", being integrated into the Tâmega river basin.

The analysis of results obtained in the application of the numerical model of precipitation / flow using hydrological modeling was also performed. The obtained results allowed the development of a flood warning model able to effectively and reliably anticipate the occurrence of flood events.

KEYWORDS: Hydrometeorological network, floods, modeling, warning, teletransmission.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA E OBJETIVOS	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
2 SISTEMAS DE ALERTA DE CHEIAS	5
2.1. ENQUADRAMENTO.....	5
2.2. SISTEMAS DE ALERTA DE CHEIAS EM OBRA.....	6
2.2.1. SISTEMA DE ALERTA DE CHEIAS NA OBRA DO AH DO BAIXO SABOR.....	8
2.2.2. SISTEMA DE ALERTA DE CHEIAS NA OBRA DO AH DE FOZ TUA.....	11
2.2.3. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DOS SISTEMAS DE ALERTA DE CHEIAS EM OBRA DOS AH BAIXO SABOR E FOZ TUA.....	14
2.2.4. SISTEMAS DE ALERTA DE CHEIAS EM OBRA EM RIOS MODIFICADOS.....	14
3 MODELAÇÃO HIDROLÓGICA	15
3.1. BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE MODELAÇÃO.....	15
3.2. CONCEITO DE MODELO HIDROLÓGICO.....	16
3.3. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS	17
3.4. APLICAÇÃO DA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA À ANÁLISE DE CHEIAS.....	20
3.4.1. COMPONENTES DE UM HIDROGRAMA	20
3.4.2. FORMA DO HIDROGRAMA E FATORES CONDICIONANTES.....	23
3.4.3. PRECIPITAÇÃO ÚTIL E A MODELAÇÃO DAS PERDAS DE PRECIPITAÇÃO	24
3.4.4. MODELOS PARA SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO DIRETO E DO ESCOAMENTO DE BASE	25
3.4.4.1. Modelo de Escoamento de Base	27
3.4.4.2. Modelo de Escoamento Direto	28
3.4.5. PROPAGAÇÃO DE HIDROGRAMAS DE CHEIA EM TRECHOS DE CANAL	29
3.4.6. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA.....	30
4 CASO DE ESTUDO E ELEMENTOS BASE	33
4.1. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TÂMEGA.....	33
4.2. APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS EXISTENTES	36
4.2.1. APROVEITAMENTO DE TORRÃO	36

4.3. APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS FUTUROS	37
4.3.1. APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE FRIDÃO	38
4.3.2. SISTEMA ELECTROPRODUTOR DO TÂMEGA.....	42
4.3.2.1. Aproveitamento Hidroelétrico do Alto Tâmega.....	43
4.3.2.2. Aproveitamento Hidroelétrico de Gouvães	44
4.3.2.3. Aproveitamento Hidroelétrico de Daivões	45
4.4. DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS UTILIZADOS	45
4.4.1. REDE HIDROMETEOROLÓGICA DO SNIRH.....	45
4.4.2. REDE HIDROMETEOROLÓGICA DA EDP PRODUÇÃO.....	47
5 APLICAÇÃO AO APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE FRIDÃO.....	53
5.1. INTRODUÇÃO	53
5.2. CORRELAÇÃO ENTRE AS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS.....	54
5.3. ELABORAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO NO HEC-HMS.....	55
5.3.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO DE BACIA	55
5.3.2. ELABORAÇÃO DO MODELO HIDROMORFOLÓGICO.....	57
5.3.2.1. Modelo de Perdas de Precipitação.....	58
5.3.2.2. Modelo de Escoamento Direto	59
5.3.2.3. Modelo de Escoamento de Base.....	60
5.3.2.4. Modelo de Propagação do Escoamento em Canal	61
5.3.3. ELABORAÇÃO DO MODELO METEOROLÓGICO	61
5.3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
5.4. CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	66
5.4.1. SITUAÇÃO 1: 11-01-2009 A 11-02-2009.....	67
5.4.2. SITUAÇÃO 2: 01-12-2009 A 19-01-2010.....	68
5.4.3. SITUAÇÃO 3: 24-12-2015 A 15-01-2016.....	70
5.4.4. SITUAÇÃO 4: 16-01-2016 A 19-02-2016.....	70
5.4.5. SITUAÇÃO 5: 18-03-2016 A 18-04-2016.....	71
5.4.6. SITUAÇÃO 6: 23-01-2017 A 06-02-2017.....	72
5.4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	73
5.5. DEFINIÇÃO DO MODELO DE ALERTA DE CHEIAS EM OBRA	74
5.5.1. SITUAÇÃO 3- 24/12 A 15/01 DO ANO HIDROLÓGICO 2015/2016.....	76
5.5.1.1. 24/12/2015 a 05/01/2016.....	76
5.5.1.2. 30/12/2015 a 09/01/2016.....	78
5.5.1.3. 31/12/2015 a 15/01/2016.....	79
5.5.2. SITUAÇÃO 4- 01/02 A 16/02 DO ANO HIDROLÓGICO 2015/2016.....	83
5.5.3. SITUAÇÃO 5- 18/03 A 18/04 DO ANO HIDROLÓGICO 2015/2016.....	85

5.5.3.1. 18/03/2016 a 31/03/2016	85
5.5.3.2. 05/04/2016 a 18/04/2016	87
5.5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
5.6. COMENTÁRIOS FINAIS.....	93
6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	95
6.1. CONCLUSÕES	95
6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	96
ANEXO A: HIDROGRAMAS DE CHEIA.....	105
ANEXO B: DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR NA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA.....	111
B.1: MÉTODO DO NÚMERO DE ESCOAMENTO DO SCS	111
B.2: MÉTODO DA ONDA CINEMÁTICA	114
B.3: MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE	119
ANEXO C: ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS	121
ANEXO D: SIMULAÇÕES OBTIDAS NA DEFINIÇÃO DO MODELO	123
D.1: SITUAÇÃO 1- 11/01 A 11/02 DO ANO HIDROLÓGICO 2008/2009	123
D.2: SITUAÇÃO 2- 01/12 A 19/01 DO ANO HIDROLÓGICO 2009/2010	127
D.3: SITUAÇÃO 6- 23/01 A 06/02 DO ANO HIDROLÓGICO 2016/2017	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1- Etapas de um sistema de alerta de cheias. (Adaptado de (Jimenez, 2016))	6
Figura 2.2-Metodologia para a criação de um sistema de alerta de cheia em obra. (EDP, 2014)	7
Figura 2.3-Recinto de obra em fase de construção, identificação de elementos e características da derivação da obra (EDP, 2014).	8
Figura 2.4-Bacia do rio Sabor, localização do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor, estações hidrométricas e pluviométricas. (EDP, 2014)	9
Figura 2.5-Correlação entre o caudal na EH de Quinta das Laranjeiras e a altura na EH Ponte de Remondes, e a definição dos níveis de alerta (EDP, 2014; Ferreira et al., 2017).	10
Figura 2.6- Exemplo de hidrograma de cheia e níveis de alerta do sistema. (EDP, 2014; Ferreira et al., 2017)	11
Figura 2.7- Identificação dos elementos e características constituintes da obra de derivação provisória, em fase de construção (EDP, 2014)	12
Figura 2.8-Planta de localização dos AH e EH da bacia do Tua. (EDP, 2014)	12
Figura 3.1- Processos da modelação extraído de (Garcia & Fransozi, 2017)	15
Figura 3.2- Componentes do ciclo hidrológico	17
Figura 3.3-Processos envolvidos na formação do escoamento superficial, extraído de (Mendes, 2017).	31
Figura 4.1-Localização da bacia hidrográfica do Tâmega (SNIRH, 2018)	33
Figura 4.2-Caracterização do levantamento hipsométrico da bacia do rio Tâmega, os rios que a constituem e as principais povoações extraído de (SNIRH, 2018).	34
Figura 4.3-Clima de Portugal Continental, segundo a classificação de Koppen (IPMA, 2018b)	35
Figura 4.4-Localização dos AH sobre a bacia do Tâmega	36
Figura 4.5-Barragem de Torrão extraído de (EDP, 2018a)	37
Figura 4.6 – Aproveitamentos que constituem o PNEBPH (adaptado de (APA, 2007)).	38
Figura 4.7-Localização dos elementos, escalão principal e barragem a jusante, constituintes do aproveitamento de Fridão (adaptado de (EDP, 2018b)).	39
Figura 4.8 – Ilustração esquemática do aproveitamento de Fridão (extraído de ((EDP, 2009)).	40
Figura 4.9-Planta geral do escalão principal do aproveitamento de Fridão, adaptado de (EDP, 2011).	41
Figura 4.10-Planta geral da barragem a jusante do aproveitamento de Fridão (EDP, 2011).	41
Figura 4.11-Localização dos aproveitamentos e identificação do Nível Pleno de e Armazenamento extraído de (Iberdrola, 2017).	43
Figura 4.12-Ilustração de um esquema do conjunto de aproveitamentos e a potência instalada em cada aproveitamento adaptado de (Iberdrola, 2017).	43
Figura 4.13-Esquema referente ao aproveitamento de Alto Tâmega extraído de (Iberdrola, 2017)	44

Figura 4.14-Constituição do circuito hidráulico do aproveitamento de Gouvães extraído de (Iberdrola, 2017).....	44
Figura 4.15-Esquema do aproveitamento de Daivões (extraído de ((Iberdrola, 2017))).	45
Figura 4.16-Estado da rede meteorológica em 2017 adaptado (APA 2018)	46
Figura 4.17-Estado da rede hidrométrica em 2017 adaptado de (APA 2018)	46
Figura 4.18-Rede hidrometeorológica explorada pela EDP	48
Figura 4.19-Estações hidrométricas situadas na bacia hidrográfica do rio Tâmega	48
Figura 5.1-Metodologia a aplicar para obtenção do sistema de alerta de cheias em obra, recorrendo a um modelo numérico precipitação/escoamento.	54
Figura 5.2- Correlação entre caudais registados nas EH de Fridão e Ponte Cavez	55
Figura 5.3-Modelo de bacia (EDP, 2011)	56
Figura 5.4-Modelo da bacia intermédia no HEC-HMS	57
Figura 5.5- Números de Escoamento (AMC II) (SNIRH, 2018)	59
Figura 5.12-Hidrograma de cheia simulado para um evento de precipitação ocorrido entre 03/01/2016 e 05/01/2016.....	65
Figura 5.13-Hidrograma de cheia simulado para eventos de precipitação ocorridos entre 24/12/2015 e 05/01/2016	65
Figura 5.14- Comparação entre as simulações obtidas iniciais e as simulações após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente aos períodos: a)11/01/2009 a 24/01/2009; b)19/01/2009 a 02/02/2009; c)30/01/2009 a 11/02/2009	67
Figura 5.15- Comparação entre as simulações obtidas iniciais e as simulações após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente aos períodos: a)01/12/2009 a 09/12/2009; b)12/12/2009 a 26/12/2009; c)18/12/2009 a 04/01/2010; d)02/01/2010 a 19/01/2010.....	69
Figura 5.16- Comparação entre as simulações obtidas iniciais e as simulações após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente aos períodos: a)24/12/2015 a 05/01/2016; b)30/12/2015 a 16/01/2016;	70
Figura 5.17- Comparação entre a simulação obtida inicial e a simulação após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente ao período 01/02/2016 a 16/02/2016.....	71
Figura 5.18-Comparação entre as simulações obtidas iniciais e as simulações após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente aos períodos: a)18/03/2016 a 31/03/2016; b)05/04/2016 a 18/04/2016.	72
Figura 5.19- Comparação entre a simulação obtida inicial e a simulação após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente ao período 23/01/2017 a 06/02/2017	73
Figura 5.20- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 24/12/2015 e 05/01/2016.....	76
Figura 5.21- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 30/12/2015 e 09/01/2016.....	78

Figura 5.22- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 31/12/2015 e 16/01/2016	80
Figura 5.23- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 01/02/2016 e 16/02/2016	83
Figura 5.24- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 18/03/2016 e 31/03/2016	85
Figura 5.25- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 18/03/2016 e 31/03/2016	86
Figura 5.26- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 05/04/2016 e 18/04/2016	88
Figura A.1 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2008/2009	105
Figura A.2 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2009/2010	105
Figura A.3 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2010/2011	106
Figura A.4 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2011/2012	106
Figura A.5 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2012/2013	107
Figura A.6 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2013/2014	107
Figura A.7 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2014/2015	108
Figura A.8 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2015/2016	108
Figura A.9 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2016/2017	109
Figura B.10 - Comparação entre onda dinâmica e onda cinemática extraído de (MacArthur & DeVries, 1993).	115
Figura B.11- Elementos usados no processo de cálculo do modelo da onda cinemática extraído de (Gomes, 2008).	115
Figura B.12- Relação entre os elementos representativos do escoamento numa bacia hidrográfica de acordo com o modelo da onda cinemática extraído de (Gomes, 2008).	116
Figura D.13- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 11/01/2009 e 24/01/2009	124
Figura D.14- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 19/01/2009 e 02/02/2009	125
Figura D.15- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 30/01/2009 e 11/02/2009	126
Figura D.16 - Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 01/12/2009 e 09/12/2009	127
Figura D.17 - Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 12/12/2009 e 26/12/2009	128
Figura D.18 - Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 18/12/2009 e 04/01/2010	129

Figura D.19- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 02/01/2010 e 19/01/2010	130
Figura D.20 - Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 23/01/2017 e 03/02/2017	131
Figura D.21- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 24/12/2015 e 05/01/2016.....	132
Figura D.22- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 30/12/2015 e 09/01/2016.....	133
Figura D.23- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 31/12/2015 e 15/01/2016.....	134

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1- Modelos matemáticos determinísticos utilizados pelo programa HEC-HMS na simulação de processos hidrológicos. ME-modelo de eventos; MC-modelo contínuo; E-empírico; A-agregado; D-distribuído; PM-parâmetros medidos e PA-parâmetros ajustados; extraído de (Mendes, 2017)	20
Quadro 3.2-Programas com escala temporal sub-diária, extraído de (Mendes, 2017)	30
Quadro 4.1-Períodos relevantes para o estudo da dissertação compreendidos entre o ano hidrológico 2006/2007 e 2016/2017	50
Quadro 4.2-Quadro resumo dos períodos referentes aos anos hidrológicos utilizados para construir o modelo meteorológico do HEC-HMS.	51
Quadro 5.1-Quadro resumo dos métodos utilizados para simular os processos hidrológicos, parâmetros requeridos e critérios de estimação adotados	58
Quadro 5.2-Valores dos parâmetros de simulação em cada sub-bacia relativos às superfícies de escoamento (EDP, 2011)	59
Quadro 5.3-Valores dos parâmetros de simulação em cada sub-bacia relativos aos troços fluviais (EDP, 2011)	60
Quadro 5.4- Estações meteorológicas utilizadas para caracterizar a bacia, para cada simulação efetuada	62
Quadro 5.5 – Quadro síntese dos valores obtidos pelo processo de calibração	73
Quadro 5.6- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=6, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento	77
Quadro 5.7- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=3, com indicação da hora em que é estimado o alerta vigilância e a hora em que se verifica o galgamento	77
Quadro 5.8- Relação entre o caudal modelado e o caudal observado, com indicação do fim de alerta laranja	77
Quadro 5.9- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=6, com indicação da hora em que é estimado o fim do alerta laranja	79
Quadro 5.10- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=3, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento	79
Quadro 5.11- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=3 do dia 14/01, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento	82
Quadro 5.12- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=6 do dia 14/01, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento	82
Quadro 5.13 Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=6, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento	84
Quadro 5.14- Relação entre caudal modelado e caudal observado para o dia 15/02, com indicação da hora em que é estimado o fim do alerta laranja	84
Quadro 5.15- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=6 do dia 28/03 e T=3 do dia seguinte, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento para o caso de T=3	87

Quadro 5.16- Relação entre caudal modelado e caudal observado para o dia 17/04, com indicação da hora em que é estimado o fim do alerta laranja.....	89
Quadro 5.17 Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=9 do dia 15/04, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento	89
Quadro 5.18-Representação do nível, data e hora do alerta, ocorrência do galgamento e o respetivo desfasamento para todos os eventos considerados sujeitos a análise para os anos hidrológicos 2008/2009 e 2009/2010	91
Quadro 5.19- Representação do nível, data e hora do alerta, ocorrência do galgamento e o respetivo desfasamento para todos os eventos considerados sujeitos a análise para os anos hidrológicos 2008/2009 e 2015/2016	92
Quadro B.1- Valores de referência do parâmetro CN, segundo o SCS, considerando um estado de humidade anterior médio (AMC-II) (extraído de (Mendes, 2017))	113
Quadro B.2- Correspondência dos números de escoamento para os diferentes estados de humidade do solo, extraído de (Mendes, 2017).	113
Quadro C.1- Estações localizadas dentro da bacia do rio Tâmega, adaptado de (SNIRH, 2018).....	121

SÍMBOLOS E ACRÓNIMOS

B – largura da bacia de restituição [m]

A – Área da secção [m²]

α – parâmetros característicos do modelo [-]

c – celeridade da onda cinemática [m]

g - aceleração da gravidade [m/s²]

I – caudal afluente [m³/s]

I_a - retenção inicial [mm]

I_{pe} – Intensidade de precipitação efetiva [mm]

k – Constante de recessão ou de esgotamento [-]

K_{HEC} – Constante de recessão exponencial [-]

m_c – parâmetros característicos do modelo [-]

n – coeficiente de Manning [m⁻³/s]

N – rugosidade do plano

O - caudal efluente [m³/s]

P – precipitação total acumulada no instante t [mm]

P_e – precipitação efetiva no instante t [mm]

Q – escoamento na formula de Manning [m³/s]

$Q_{(t)}$ – caudal para o instante t [m³/s]

q – caudal por unidade de comprimento de canal [m³/s/m]

q_l – caudal lateral por unidade de comprimento de canal, relativo à área drenante [m³/s/m²]

Q_c – caudal de descarga [m³/s]

Q_o – caudal proveniente do escoamento de base no instante da simulação [m³/s]

Q_o – caudal proveniente do esgotamento dos aquíferos no instante t_0 [m³/s]

q_o – caudal por unidade de largura [m²/s]

R – raio hidráulico [m]

S – retenção inicial máxima [mm]

S – declive da superfície [m/m]

t – tempo [s]

t_0 – instante inicial [s]

x – distância [m]

y – altura do escoamento [m]

y_o – altura média do escoamento [m]

AH – Aproveitamento hidroelétrico

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

CN – curve number

EH – Estação hidrométrica

EP – Estação pluviométrica

EDP – Energias de Portugal

HEC-HMS – Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System

INAG – Instituto da Água

IPMA – Instituto Português do Mar e Atmosfera

NPA – Nível Pleno de Armazenamento

PNBEPH – Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico

SACO – Sistema de alerta de cheias em obra

SCS – Soil Conservation Service

SET – Sistema Electroprodutor do Tâmega

SI – Sistema Internacional

SMA - Soil Moisture Accounting

SMS – Short Message Service

SNIRH – Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO DO TEMA

As cheias, entre todos os tipos de desastres naturais, são as que têm maior frequência de ocorrência, sendo responsáveis por 39% de todos os desastres naturais desde 2000, com mais de 94 milhões de pessoas a serem afetadas por este fenómeno, a cada ano, em todo o mundo, não só devido à destruição de habitações e infraestruturas, ou à contaminação da água, tornando-a não potável, mas também à possibilidade de causar ferimentos e até perda de vidas. (Emerton et al. 2016).

De modo de mitigar os danos estruturais, ambientais e sociais provocados pelas cheias, tem vindo a ser desenvolvidos modelos de alerta de cheias, também designados por sistemas de alerta de cheias, com o objetivo de prever, com relativa antecedência e precisão, as condições futuras do rio, e alertar as entidades responsáveis, população residente e/ou operadores de obras hidráulicas na região afetada (Parker, 2017; Silva Souza, De Lima Curvello, De Souza, & Da Silva, 2017).

Um sistema de alerta de cheias integra componentes de hidrologia e, eventualmente, de exploração de albufeiras, cujos resultados permitem prever atempadamente a propagação de uma onda de cheia e que áreas irão provavelmente ser inundadas, informação que constitui a base para atuação dos sistemas de proteção civil, intervenções de emergência e até evacuação de pessoas (Hipólito & Vaz, 2011).

A EDP Produção, enquanto promotora de um conjunto muito significativo de aproveitamentos hidroelétricos tem vindo a desenvolver sistemas de previsão e alerta de cheias para implementação durante a construção de alguns dos seus aproveitamentos hidroelétricos, como por exemplo nos casos dos AH Baixo Sabor e AH Foz Tua. A implementação deste tipo de sistemas tem como objetivo prever situações de cheia, durante a fase de construção do aproveitamento, de modo a prevenir acidentes e garantir a proteção de bens materiais, ambientais e pessoais afetos ao local da obra.

Nesse sentido, no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Ramo de Hidráulica, surgiu a oportunidade de realizar a presente dissertação em ambiente empresarial, nas instalações da Direção de Engenharia de Barragens da EDP Produção, no Porto. Num ambiente de estreita colaboração, foi possível desenvolver e propor um modelo de alerta de cheias a ser implementado na fase de execução do AH de Fridão, previsto no âmbito do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), a ser construído na bacia do rio Tâmega.

Para o aproveitamento em questão, foi necessário aplicar uma metodologia diferente do que a EDP Produção tinha desenvolvido para a fase de construção dos AH Baixo Sabor e AH de Foz Tua, devido à expectável alteração do regime de curso de água, face à construção de aproveitamentos situados a montante do local de implementação do AH de Fridão. Com essa alteração de regime, surge a necessidade de prever os escoamentos para o local mencionado recorrendo à modelação hidrológica.

1.2.OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

De acordo com o exposto anteriormente, o presente trabalho destina-se ao desenvolvimento de um modelo de alerta de cheias a aplicar na execução do aproveitamento hidroelétrico (AH) de Fridão, recorrendo a um modelo de precipitação/escoamento, utilizando um software comercial adequado.

A aplicação do referido modelo para AH de Fridão, previsto para a bacia do rio Tâmega, deverá ter em conta um cenário de situação futura, após entrada em funcionamento dos aproveitamentos hidroelétricos em construção e/ou previstos a montante do referido aproveitamento (Daivões, Gouvães e Alto Tâmega). O programa utilizado para a simulação hidrológica é o HEC-HMS.

Esta dissertação previa também, inicialmente, a realização de um modelo de alerta de cheias baseado na correlação dos registos de estações hidrométricas localizadas na bacia do rio Tâmega. No entanto, face à natureza estritamente teórica deste modelo, devido às alterações de regime do curso de água do Tâmega na bacia intermédia entre os AH Daivões e Fridão, após a construção dos aproveitamentos de Daivões, Gouvães e Alto Tâmega, e ainda a algumas limitações nos dados, considerou-se pertinente não desenvolver aprofundadamente este tipo de modelo.

Um segundo objetivo relaciona-se com a análise de resultados da aplicação do modelo de alerta de cheias a aplicar na fase de execução do aproveitamento hidroelétrico de Fridão, expondo as limitações mais evidentes e apresentando sugestões para desenvolvimentos futuros.

1.3.ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se estruturada em seis capítulos. A descrição de cada um é feita de forma sucinta em seguida, evidenciando-se o assunto de cada um deles, assim como os aspetos fundamentais abordados.

No presente capítulo realiza-se um enquadramento do tema e dos objetivos que estão na base deste estudo.

O conceito de modelo de alerta de cheias é apresentado no capítulo 2. Nesse mesmo capítulo, são igualmente abordados os modelos desenvolvidos pela EDP Produção, com enfoque na fase de construção de um aproveitamento hidroelétrico, dando como exemplo os sistemas de alerta de cheias em obra desenvolvidos para os aproveitamentos hidroelétricos de Foz Tua e do Baixo Sabor.

O capítulo 3 aborda, genericamente, alguns conceitos associados à modelação, focando-se na definição de modelo hidrológico e sua classificação. É também apresentado o *software* informático usado na modelação e simulação de eventos de cheia para desenvolver o modelo de alerta de cheias pretendido, sendo também apresentados os métodos disponíveis no programa de simulação HEC-HMS, descrevendo especificamente aqueles que serão utilizados na modelação.

O capítulo 4 remete para o caso de estudo, começando por efetuar uma breve descrição da bacia do Tâmega, seguindo-se uma breve descrição do maior aproveitamento hidroelétrico (AH) nela existente, bem como dos previstos no âmbito do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH). Este capítulo termina com a descrição dos dados utilizados na modelação dos eventos de cheia, fazendo referência à rede de monitorização explorada pela APA, cujos dados são disponibilizados no portal público do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH), bem como à rede hidrometeorológica explorada pela EDP Produção.

O capítulo 5 é reservado ao desenvolvimento e aplicação de um modelo hidrológico à zona de estudo, recorrendo ao software HEC-HMS, com o objetivo de definir um sistema de alerta de cheias para

implementação e funcionamento durante a construção do AH Fridão. É também efetuada uma breve análise à pertinência e viabilidade de desenvolvimento de um sistema de alerta de cheias idêntico aos desenvolvidos para o AH Baixo Sabor e AH Foz Tua.

Por último, no capítulo 6, são expostas as principais conclusões obtidas com a realização deste estudo e apresentadas sugestões para desenvolvimentos futuros.

2

SISTEMAS DE ALERTA DE CHEIAS

2.1. ENQUADRAMENTO

Uma cheia pode ser definida como um fenómeno hidrológico extremo causado por precipitação intensa de duração mais ou menos prolongada numa bacia hidrográfica ou em parte dela, originando caudais que excedem, por vezes significativamente, a área ocupada pelo leito normal do curso de água, em resultado de processos hidrológicos de comportamento não linear, originando a inundação dos terrenos marginais. Com esta definição, o conceito de cheia fica associado ao de inundação fluvial (Hipólito & Vaz, 2011; Mendes, 2017).

São várias as medidas para minimizar os impactos negativos das cheias, podendo ser agrupadas em duas categorias: medidas de carácter estrutural e medidas de carácter não estrutural. As primeiras estão relacionadas com a construção e operação de infraestruturas, enquanto, as de carácter não estrutural são implementadas através de mecanismos jurídicos, regulamentares e de organização institucional e social (Hipólito & Vaz, 2011).

Entre as medidas de carácter estrutural, podem ser referir as albufeiras, os diques de defesa, as zonas de encaixe de cheias, a regularização fluvial e o dimensionamento para cheias de outras infraestruturas.

Por outro lado, entre as medidas de carácter não estrutural, estão os sistemas de previsão em que se enquadra os sistemas de alerta de cheias, e o ordenamento físico das bacias hidrográficas.

Uma vez que as cheias podem provocar elevados prejuízos materiais, mas principalmente perda de vidas humanas, desenvolveu-se o interesse em antecipar a próxima cheia para reduzir danos e aproveitar ao máximo os seus benefícios (restabelecer reservas hídricas, fertilizar solos, transporte de sedimentos, entre outros). As primeiras tentativas de prever uma situação de cheia e fornecer avisos para as populações remontam ao século XX como uma extensão natural de observações meteorológicas em agências meteorológicas estabelecidas no século XIX (Parker 2017).

O desenvolvimento de um sistema de alerta de cheias pode ser complexo e divide-se em várias etapas, representadas no seguinte fluxograma.

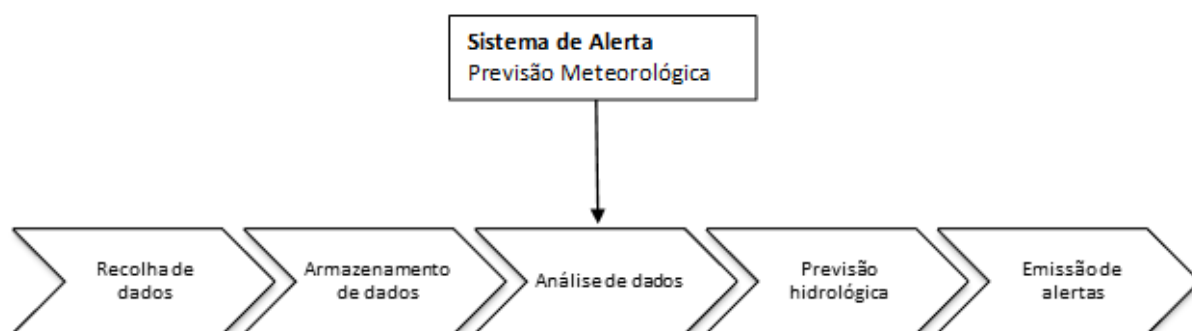


Figura 2.1- Etapas de um sistema de alerta de cheias. (Adaptado de (Jimenez, 2016))

A previsão meteorológica corresponde à previsão do estado do tempo. Esta surgiu da necessidade de conhecer antecipadamente as condições do tempo futuro. Para além desta informação ter um papel importante em atividades humanas (agricultura, construção civil, entre outras), é também utilizado para melhorar o alcance das previsões de escoamento (IPMA, 2018a).

A recolha e armazenamento de dados deve ser feita de forma automática, em tempo real, com base numa rede de monitorização hidrometeorológica constituída por estações hidrométricas e meteorológicas.

A análise de dados deve ser feita periodicamente de forma a verificar a calibração dos sensores para evitar a transmissão de falsos alertas e/ou a falha de alertas na ocorrência de eventos de cheia.

A previsão hidrológica, designado também por simulação hidrológica, é obtida com base num modelo de precipitação/escoamento e tem sido cada vez utilizada quer em entidades públicas como também em empresas privadas pois permite simular o escoamento em situações futuras.

Através desse modelo, os hidrogramas de cheia e as respetivas alturas de água podem ser estimados com base em dados de caudais registados em secções do rio localizadas mais a montante e de dados de precipitação sobre a bacia. Desta maneira, é possível ter uma previsão de um evento de cheia com uma antecedência que poderá ser de horas, para bacias de média dimensão, ou até superiores a um dia, para bacias de dimensão muito elevada (Hipólito & Vaz, 2011). Este tema será desenvolvido com maior detalhe numa fase posterior.

Os sistemas de alerta de cheia, normalmente, são desenvolvidos e implementados para a fase de exploração de um aproveitamento hidroelétrico, no entanto, também podem ser desenvolvidos num rio não modificado, isto é, sem a presença de qualquer AH. A EDP Produção tem desenvolvido, nos últimos anos, sistemas de alerta destinados a prevenir acidentes e garantir a proteção de bens materiais e ambientais. A EDP Produção implementou esse tipo de sistemas de alerta de cheias para a fase de construção dos AH de Baixo Sabor e de Foz Tua.

2.2.SISTEMAS DE ALERTA DE CHEIAS EM OBRA

O sistema de alerta de cheias em obra (SACO) consiste na emissão de alertas via SMS às entidades intervenientes tendo por base a simulação da evolução dos caudais nos locais afetos à obra. A emissão destes alertas permite uma atuação atempada das entidades responsáveis. Na figura 2.2 está representado um esquema genérico do desenvolvimento e implementação de um SACO (Ferreira, Silva, & Silva, 2017)

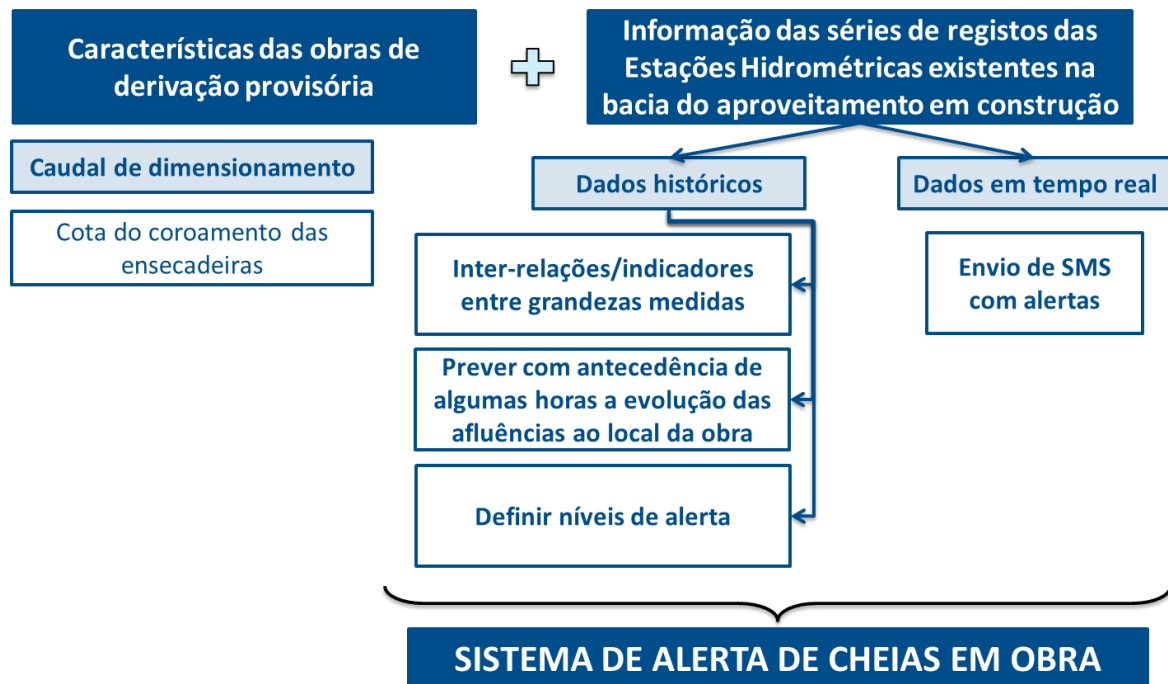


Figura 2.2-Metodologia para a criação de um sistema de alerta de cheia em obra. (EDP, 2014)

De modo a tornar exequível a construção dos AH são necessárias obras de derivação provisória que visam desviar do leito do rio os caudais mais frequentes de forma a evitar inundações ao local onde são construídos os elementos constituintes do aproveitamento hidroelétrico.

A definição e implementação deste tipo de sistemas ocorre, geralmente, em duas fases. Numa fase inicial, de definição do sistema de alerta, é realizada uma análise dos indicadores (altura de água e/ou caudal) com base no conhecimento das características das obras de derivação provisória (caudal de dimensionamento da galeria de coroamento das ensecadeiras) e na informação disponível num conjunto de estações hidrométricas (EH), exploradas pela EDP Produção localizadas sobre a bacia, a montante do aproveitamento hidroelétrico (AH). O estabelecimento das relações nível/caudal resulta na definição dos níveis de alerta, aos quais se associou o envio automático de mensagens escritas (SMS) para representantes das entidades responsáveis pela gestão, fiscalização e segurança das obras em curso (Conceição, Ferreira, & Silva, 2014; Ferreira et al., 2017).

Numa fase posterior, de implementação/exploração do sistema é realizado uma comparação em tempo real dos dados das EH com os níveis de alerta definidos.

Para implementar com sucesso o sistema de alerta é necessário ter estações equipadas com teletransmissão capazes de fornecer dados em tempo real à central de controlo. Os alertas são emitidos via SMS e consistem em dois níveis de alerta: o nível vigilância, que avisa as entidades intervenientes a estarem em modo de prevenção e o nível de alerta laranja, que avisa as entidades sobre um possível galgamento num determinado intervalo de tempo (Conceição et al., 2014; Ferreira et al., 2017).

Como referido, este tipo de sistema de alerta foi aplicado na execução dos aproveitamentos hidroelétricos do Baixo Sabor (AHBS) e de Foz Tua (AHFT).

Nos próximos subcapítulos estão descritos ao detalhe os sistemas utilizados para cada um dos aproveitamentos.

2.2.1. SISTEMA DE ALERTA DE CHEIAS NA OBRA DO AH DO BAIXO SABOR

No caso do AHBS (Escalão de Montante), tendo em conta o regime hidrológico do rio, as características topográficas e geológicas do local, o tipo de barragem previsto e o “layout” da solução para o aproveitamento hidroelétrico adotou-se para a derivação provisória uma solução convencional constituída por duas ensecadeiras (de montante e jusante) e uma galeria contornando a zona do leito do rio protegida por aquelas estruturas, localizada na margem esquerda (Conceição et al., 2014).

Relativamente à determinação do caudal de dimensionamento da galeria de derivação provisória (caudal máximo a derivar através da galeria sem galgamento das ensecadeiras) de cada um dos AH, foi calculado em função dos caudais médios diários registados em EH localizadas na proximidade do recinto de obra. Para o AHBS foi utilizada a EH de Quinta das Laranjeiras, localizada no rio Sabor (Figura 2.4), (Conceição et al., 2014).

Admitiu-se, como tem sido usual neste tipo de obras, que o caudal de dimensionamento podia ser igualado ou excedido, em média, cerca de 10 dias por ano, correspondente 3% na curva de caudais médios classificados. Neste AH, fixou-se o valor de $200\text{m}^3/\text{s}$ (Figura 2.3) (Conceição et al., 2014).



Figura 2.3-Recinto de obra em fase de construção, identificação de elementos e características da derivação da obra (EDP, 2014).

Relativamente aos dados hidrométricos, no caso do AH do Baixo Sabor (2011), recorreu-se aos registos de duas das EH localizadas na bacia do rio Sabor, nomeadamente, as EH Ponte de Remondes e Quinta das Laranjeiras. A primeira entrou em funcionamento em 1955, dominando uma bacia hidrográfica de 2803 km^2 e a segunda, regista dados desde 1942, e domina uma bacia de 3464 km^2 . A figura 2.4 ilustra a bacia do rio Sabor, a localização do aproveitamento hidroelétrico e das estações hidrométricas e pluviométricas em exploração na bacia, aquando da definição do SACO (EDP, 2014).



Figura 2.4-Bacia do rio Sabor, localização do aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor, estações hidrométricas e pluviométricas. (EDP, 2014)

A análise das séries das EH permitiu conhecer a evolução dos caudais afluentes à obra no troço fluvial situado entre as duas estações. De modo a quantificar o caudal que irá definir os níveis de alerta recorreu-se às características da obra de derivação provisória (Figura 2.3) em termos de caudais de dimensionamento da galeria e das cotas da ensecadeira.

A análise das séries das duas EH referidas permitiu retirar as seguintes conclusões (figuras 2.5 e 2.6):

- existência de uma forte correlação entre os caudais registados nas duas estações em análise;
- quando é atingido, na EH Ponte de Remondes, o caudal na ordem dos 160 m³/s (altura hidrométrica h=3,0 m), com tendência para aumento, há uma forte probabilidade de ser atingido o caudal de 200 m³/s no local da EH Quinta das Laranjeiras, o qual corresponde ao valor adotado no dimensionamento da derivação provisória (EDP 2014).

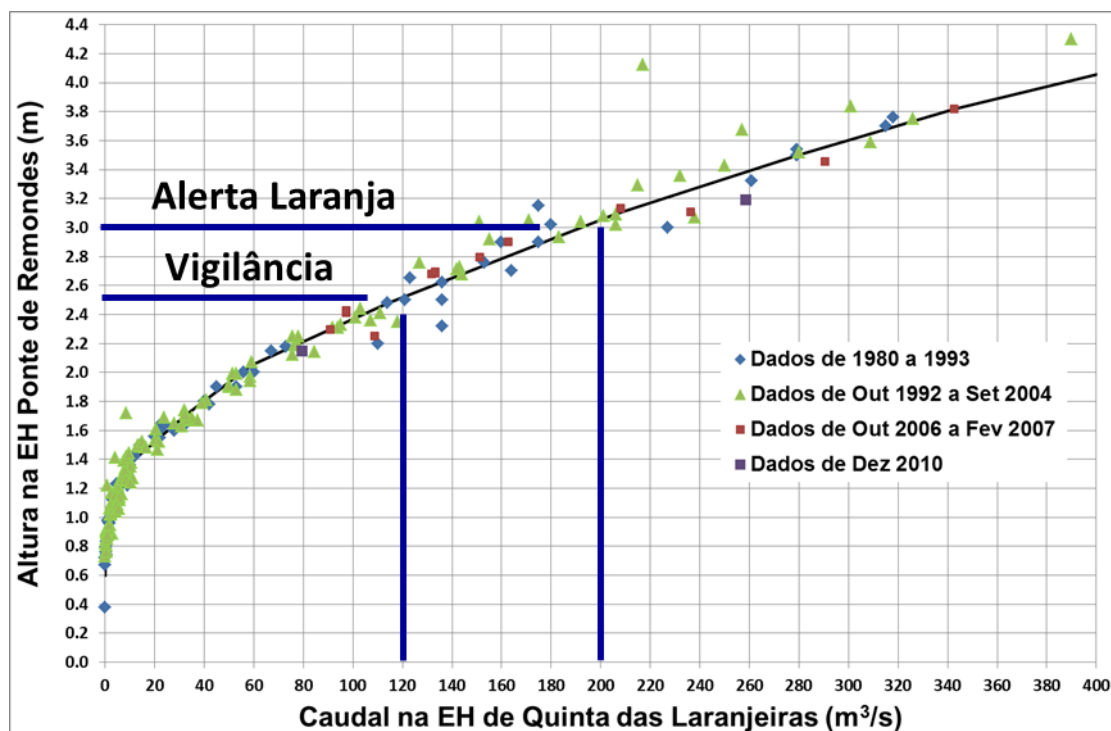


Figura 2.5-Correlação entre o caudal na EH de Quinta das Laranjeiras e a altura na EH Ponte de Remondes, e a definição dos níveis de alerta (EDP, 2014; Ferreira et al., 2017).

Foram então definidos os níveis de alerta, relacionados com a possibilidade de ocorrência de galgamento do recinto da obra, aos quais se associou o envio automático de SMS para as entidades responsáveis pela gestão, fiscalização e segurança das obras em cursos.

Deste modo, foi definido um nível de alerta amarelo, na EH Ponte Remondes, (vigilância) para um caudal de 100 m³/s e um alerta laranja para um caudal de 160 m³/s (Figura 2.5). Na figura 2.6 está ilustrado um exemplo de hidrograma de cheia e os respetivos níveis de alerta do sistema (EDP, 2014).

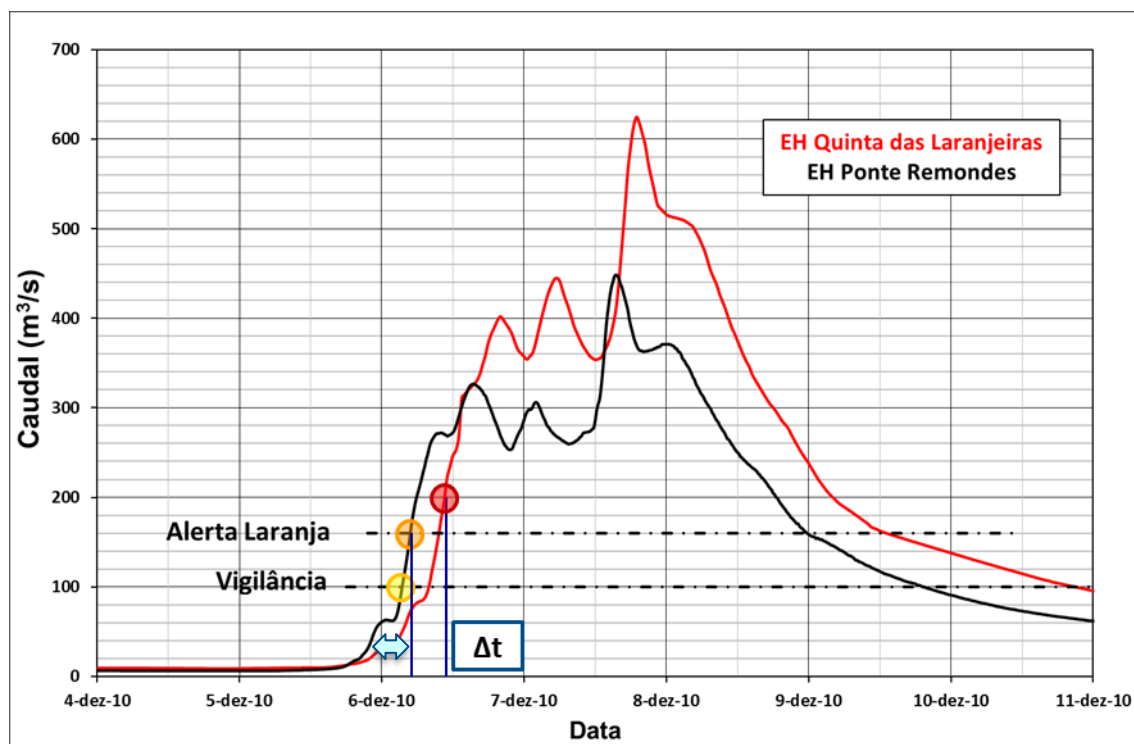


Figura 2.6- Exemplo de hidrograma de cheia e níveis de alerta do sistema. (EDP, 2014; Ferreira et al., 2017)

A análise de vários hidrogramas de cheia permitiu perceber que o desfaseamento mínimo entre o alerta laranja e o início do galgamento da ensecadeira seria sempre superior a 4h. Mais tarde, após a sua implementação, sempre que houve galgamento, o desfaseamento verificado foi sempre superior a 5h, estando por isso, de acordo com o dimensionado (EDP, 2014; Ferreira et al., 2017).

Foi dado o alerta em 16 ocasiões, tendo, em 7 delas sido acionado o alerta laranja após a emissão do alerta de vigilância. Em todas estas situações verificou-se o galgamento do recinto das obras (EDP, 2014; Ferreira et al., 2017).

2.2.2.SISTEMA DE ALERTA DE CHEIAS NA OBRA DO AH DE FOZ TUA

Para o AH Foz Tua (2014) foi definido um sistema semelhante ao utilizado no anterior, mas mais complexo, uma vez que existe um afluente (rio Tinhela) na bacia intermédia entre as duas estações do curso principal do rio Tua, que se verificou poder ter importância em situações de cheia. A figura 2.7 mostra a localização das estações hidrométricas situadas na bacia do Tua.

No caso do AHFT, a solução adotada para a derivação provisória é semelhante ao AHBS, constituída por duas ensecadeiras (de montante e jusante) e uma galeria contornando a zona do leito do rio (ver figura 2.8). Para este aproveitamento, devido à sua proximidade da convergência com o rio Douro, foi também avaliada a possibilidade de, numa situação de cheia, o aumento do caudal no rio Douro poder provocar o galgamento da ensecadeira de jusante. Neste caso, as obras derivação provisória foram dimensionadas considerando a probabilidade do caudal nos rios Tua e Douro (neste caso, considerando o regolho da albufeira da Régua) ser igualado ou excedido 8 dias por ano, tendo-se obtido, respetivamente, os valores de 320 m³/s e 3000 m³/s



Figura 2.7- Identificação dos elementos e características constituintes da obra de derivação provisória, em fase de construção (EDP, 2014)

Relativamente aos dados hidrométricos, no caso do AHFT (2014), recorreu-se aos registos de duas das EH localizadas na bacia do rio Tua, nomeadamente, as EH de Castanheiro e Vilarinho de Azenhas (Figura 2.8). A primeira entrou em funcionamento em 1958, dominando uma bacia hidrográfica de 3758 km² e a segunda, regista dados desde 1955, e domina uma bacia de 2945 km². A figura 2.8 ilustra a bacia do rio Tua, a localização do aproveitamento hidroelétrico e das estações hidrométricas em exploração na bacia, aquando da definição do SACO (EDP, 2014).

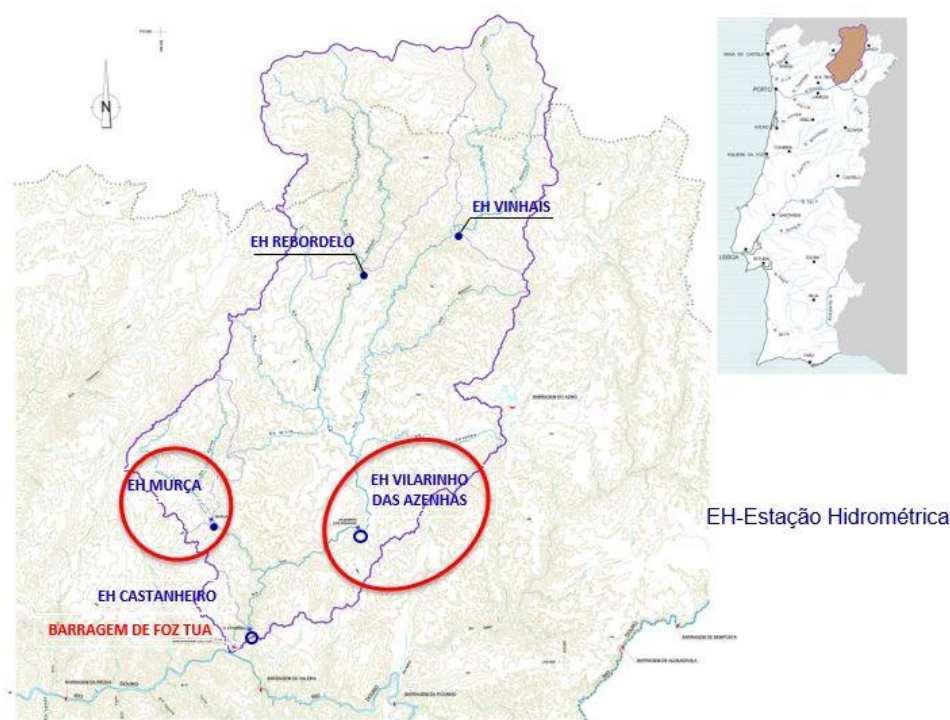


Figura 2.8-Planta de localização dos AH e EH da bacia do Tua. (EDP, 2014)

A análise efetuada aos níveis registados em ambas as EH, no período compreendido entre os anos hidrológicos 2006/07 e 2013/14, permitiu as seguintes conclusões (Conceição et al., 2014).

- Em mais de metade dos eventos, quando registado o caudal de 200 m³/s na EH de Castanheiro foi também registado o caudal de 320 m³/s nessa estação, com um desfasamento superior a 1 hora;
- Quando atingida, na EH de Vilarinho das Azenhas, a altura hidrométrica de 2.86 m verificou-se que em 80% das situações analisadas foi atingida a altura hidrométrica de 5.40 m na EH de Castanheiro (à qual corresponde um caudal de 320 m³/s), com um desfasamento médio de cerca de 2h30min;
- O galgamento da ensecadeira teria ocorrido em 85% das situações em que se registou um caudal superior a 200 m³/s na EH de Castanheiro e u e uma altura superior a 2.86 m na EH de Vilarinho das Azenhas ou um caudal superior a 320 m³/s na EH de Castanheiro, mesmo não tendo sido atingida a altura hidrométrica de 2.86 m na EH de Vilarinho das Azenhas.
- Em 80% das situações analisadas, a altura de 2.86 m na EH de Vilarinho das Azenhas foi atingida depois de se registar o caudal de 200 m³/s na EH de Castanheiro.

Atendendo, por um lado, à evolução dos caudais no rio Tua e, por outro, à variação na capacidade de vazão da galeria de derivação em função dos caudais ocorridos no rio Douro, verificou-se ainda que (Conceição et al., 2014):

- O desfasamento entre o momento em que simultaneamente se verificou um caudal superior a 200 m³/s na EH de Castanheiro e uma altura superior a 2.86 m na EH de Vilarinho das Azenhas e o momento em que ocorreria o galgamento da ensecadeira de montante foi, em média, 3.5 horas.
- O desfasamento entre o momento em que ocorreram 320 m³/s na EH de Castanheiro e o momento em que ocorreria o galgamento da ensecadeira de montante foi, em média, 1.5 horas.

Foi ainda efetuada uma avaliação adicional, considerando os registos da EH Murça, situada no rio Tinhela, tendo-se verificado que, na quase totalidade das situações, a contribuição do rio Tinhela não foi determinante da evolução dos níveis/caudais no rio Tua conducentes à possível inundação do recinto das obras do AHFT.

No que respeita à influência dos caudais do Douro no local da obra, ao efetuar uma análise dos registos de exploração relativos às barragens da Valeira e da Régua, no período compreendido entre 2000/01 2013/14, concluiu-se que não se justificaria a implementação para o rio Douro de um sistema de alerta análogo ao desenvolvido para o rio Tua.

Face ao exposto, foram estabelecidos os seguintes cenários, tendo os dois últimos uma probabilidade muito reduzida de ocorrência, tal como já foi referido (EDP, 2014):

- Cenário 1: nível de alerta amarelo em Castanheiro e, posteriormente, emitido o nível de alerta em Vilarinho de Azenhas, resulta no alerta laranja;
- Cenário 2: nível de alerta amarelo em Vilarinho das Azenhas e, posteriormente, emitido o nível de alerta em Castanheiro, resulta no alerta laranja;
- Cenário 3: contribuição exclusiva do rio Tinhela, não sendo emitido qualquer alerta em Vilarinho das Azenhas;
- Cenário 4: Influência do Regolfo da albufeira da Régua provocando o galgamento recinto da obra. Acontece quando o caudal do rio Douro é superior a 3000 m³/s e o caudal registado no Tua é inferior a 320 m³/s.

Da análise da série de dados para os dois primeiros cenários resulta um desfasamento médio de 3,5h entre o alerta laranja e o início do galgamento da ensecadeira (EDP, 2014).

Durante a fase de implementação do SACO do AH Foz Tua o alerta amarelo foi dado por 6 ocasiões, das quais 4 evoluíram para alerta laranja, verificando-se o galgamento do recinto das obras em 3 situações. O galgamento ocorreu sempre pelo menos 1h após o alerta laranja, período de tempo mais curto do que no caso do AHBS, mas expectável, face aos condicionamentos existentes (EDP, 2014; Ferreira et al., 2017).

2.2.3. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DOS SISTEMAS DE ALERTA DE CHEIAS EM OBRA DOS AH BAIXO SABOR E FOZ TUA

Os sistemas de alerta de cheias em obra nos AH Baixo Sabor e Foz Tua foram considerados simples, fiáveis e económicos (revelando baixos encargos de instalação e exploração). A utilização destes sistemas permitiu uma atuação atempada das entidades intervenientes na prevenção de acidentes e na proteção de bens materiais e ambientais (EDP, 2014; Ferreira et al., 2017).

De salientar, no entanto, que a conceção e implementação destes sistemas só foi possível pelo facto de a EDP Produção manter em exploração uma rede hidrometeorológica com séries de dados extensas e fiáveis.

Por outro lado, este tipo de modelo apenas é aplicável a cursos de água em regime natural, na medida em que utiliza registos históricos mais ou menos extensos para estabelecer correlações que permitem definir os níveis de alerta. Para rios modificados, deixa de haver uma correlação direta entre as grandezas medidas nas estações hidrométricas devido à alteração do regime presente no curso de água.

2.2.4. SISTEMAS DE ALERTA DE CHEIAS EM OBRA EM RIOS MODIFICADOS

No caso de rios modificados, um modelo de alerta análogo aos descritos anteriormente deixa de ser aplicável pelas razões mencionadas no subcapítulo acima. Uma solução para a construção de um modelo de alerta de cheias num rio modificado poderá ser obtida via simulação hidrológica.

A simulação hidrológica pretende representar os processos envolvidos na determinação de escoamentos superficiais face a um evento de precipitação e tem vindo a ser cada vez mais utilizada quer por entidades públicas e empresas privadas.

Um dos objetivos desta dissertação passa pelo desenvolvimento de um modelo de alerta de cheias em obra recorrendo a um *software* de simulação hidrológica, tendo como base um modelo de precipitação/escoamento.

No próximo capítulo será descrito mais pormenorizadamente o conceito de modelação hidrológica, os modelos e métodos envolventes e uma descrição do programa de simulação hidrológica a utilizar no desenvolver da dissertação.

3 MODELAÇÃO HIDROLÓGICA

No presente capítulo são apresentados os métodos utilizados na simulação hidrológica, sendo efetuado numa primeira fase um enquadramento sobre a modelação aplicada à hidrologia, a definição de modelo hidrológico e as suas respectivas classificações. Numa fase posterior, é descrito o programa utilizado para a simulação hidrológica e os métodos numéricos inerentes ao modelo.

3.1.BREVES CONSIDERAÇÕES SOBRE MODELAÇÃO

Um modelo pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando na compreensão dos processos que a envolvem. O recurso à modelação tem sido cada vez mais elevado sobretudo em questões de planeamento ambiental pois permite fazer a análise não só da situação presente ou passada, como também elaborar e analisar cenários de situações futuras (Rennó & Soares, 2000).

A figura 3.1 representa o esquema geral do procedimento utilizado para a resolução através da modelação.

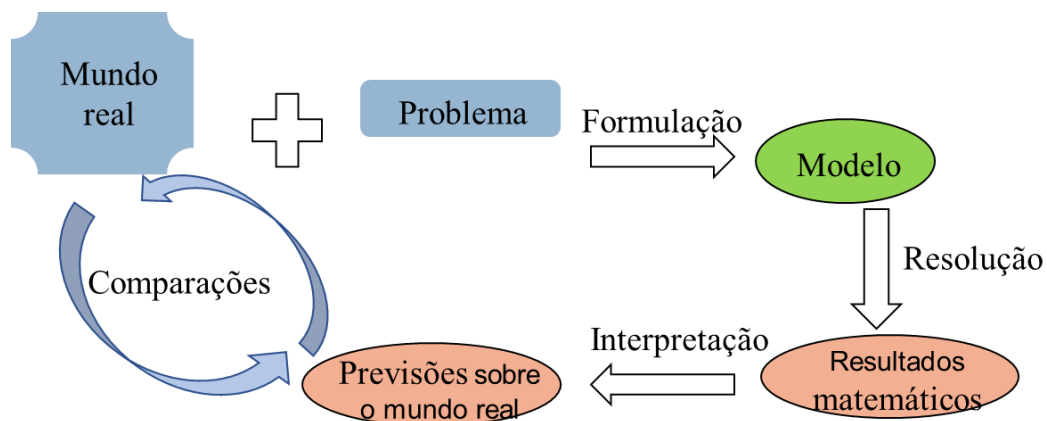


Figura 3.1- Processos da modelação extraído de (Garcia & Fransozi, 2017)

Numa fase inicial é necessário identificar corretamente o problema e em que condições se insere no mundo real de modo a proceder a uma correta formulação do modelo. Com os resultados matemáticos gerados pelo modelo prossegue-se, à interpretação desses mesmos resultados de modo a obter previsões sobre acontecimentos futuros. A realização de comparações entre as previsões e o que acontece e/ou aconteceu na realidade permite ajustar o modelo, iniciando desse modo um ciclo até que as previsões se

aproximam com o que acontece na realidade. Esse processo pode ser designado como calibração do modelo e irá ser estudado mais pormenorizado numa fase posterior.

De um modo geral, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros. Por um lado, as variáveis como o próprio nome indica, estão sujeitas a variações ao longo do tempo em que o modelo estiver a ser executado. Por outro lado, o parâmetro, por norma, possui o mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que não possa variar espacialmente. (Rennó & Soares, 2000). Os parâmetros são medidas numéricas de propriedades reais e complexas que controlam a relação entre o que entra e o que sai do sistema. Através da manipulação destes valores torna-se possível calibrar o modelo e prever a resposta física do sistema com maior precisão. Os parâmetros de determinado modelo podem, ou não, ter significado físico. Caso não tenham só é possível estimar o seu valor através de calibração (Maidment, 1993).

Num modelo é possível distinguir três tipos de variáveis: variável de estado, a de processo, e condições fronteira. A primeira, chamada variável de estado, é o foco de estudo do modelo. Esta variável relaciona-se geralmente com uma equação diferencial. O estado do sistema pode ser descrito apenas por verificação desta variável. Como exemplo, na modelação do balanço de água no solo, uma variável de estado pode ser o conteúdo de água no solo. O segundo tipo de variável é a de processo, tipicamente, os fluxos são calculados como função das variáveis de estado. Também os parâmetros podem ser utilizados no cálculo de fluxos. Novamente, a taxa de infiltração pode ser considerada uma variável de processo que altera o conteúdo de água no solo (variável de estado). O terceiro, e último tipo, refere-se ao conjunto de variáveis ditas de condição tendo a sua variação de ser traduzida para que possa ser incorporada. Regra geral, este tipo de variável representa um fluxo externo ao modelo que o alimenta ou esgota. A chuva, no exemplo seguido, traduz uma condição fronteira do sistema (Gomes, 2008; Maidment, 1993).

O valor das variáveis de estado deve ser armazenado a cada iteração de modo a ser possível fazer o acompanhamento do estado do sistema ao longo do período de modelação. Por outro lado, os fluxos, que são calculados a cada instante, não necessitam que o seu histórico seja armazenado. A importância de se identificar cada tipo de variável presente num modelo reside no facto de esta definição influenciar a escolha da estrutura de dados para a sua implementação (Maidment, 1993).

No âmbito da hidrologia, a modelação é aplicada com diversas finalidades, nomeadamente para a previsão de caudais de cheia e de volumes de escoamento resultantes pela ocorrência de precipitação intensa e/ou de longa duração.

Nos próximos subcapítulos serão abordados com maior detalhe o modelo aplicado à hidrologia, designado por modelo hidrológico.

3.2. CONCEITO DE MODELO HIDROLÓGICO

Um modelo hidrológico pode ser definido como uma representação matemática do escoamento de água e seus constituintes, sobre uma parte da superfície e/ou superfície terrestre. (Maidment, 1993). No âmbito da hidrologia, geralmente, os modelos são designados por modelos de precipitação-escoamento, pois têm como principais dados de entrada (input) valores conhecidos de precipitação e como dados de saída (output) valores desconhecidos de escoamento. Existem modelos hidrológicos que permitem determinar valores de escoamento numa dada secção de uma linha de água, partindo do conhecimento de valores de escoamento em secções a montante relativamente à secção pretendida. Nesse contexto, um modelo hidrológico representa, geralmente, a resposta de uma bacia hidrográfica à precipitação que nela ocorre e/ou a um caudal que lhe é introduzido num ponto específico. (Fan, 2015; Mendes, 2017).

O modelo hidrológico utilizado no realizar da dissertação é o que possibilita o cálculo do hidrograma de cheia numa dada secção da bacia partindo do hidrograma de cheia numa secção a montante e do escoamento resultante da precipitação que ocorre na bacia intermédia.

De modo a entender melhor os modelos hidrológicos, é necessário analisar as componentes envolvidas no ciclo hidrológico (Figura 3.2). Tratando-se de um ciclo torna-se difícil identificar um princípio ou fim, no entanto, tomando a atmosfera como ponto de partida, verifica-se uma acumulação de vapor de água que, em determinadas circunstâncias, origina a precipitação de chuva, granizo, neve, orvalho e geada. Parte dessa precipitação é evaporada durante a queda, retornando à atmosfera. Outra fração é, ainda, retida pela vegetação voltando também à atmosfera. Uma fração da precipitação que atinge a superfície da terra fica retida nela, dando origem à evaporação e ao escoamento superficial, na rede hidrográfica, de onde é também evaporada ou atinge o oceano que representa a maior fonte de evaporação. Outra parte da precipitação que atinge a superfície dá origem à infiltração, humedecendo o solo que também é fonte de evaporação, alimentando as plantas, através das quais volta à atmosfera por transpiração, ou alimentando os cursos de água diretamente os oceanos de onde será evaporada, fechando-se o ciclo (Lencastre, A., Franco, 2010).

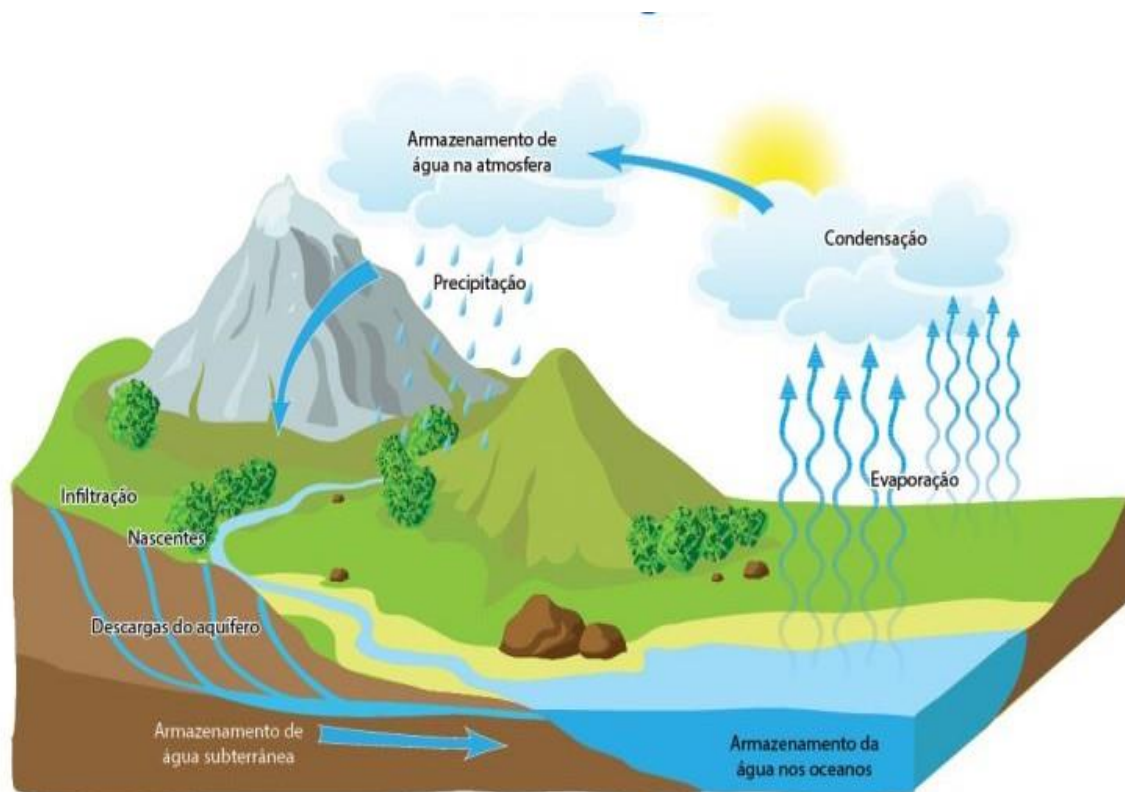


Figura 3.2- Componentes do ciclo hidrológico

3.3.CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS HIDROLÓGICOS

Como já referido anteriormente, um modelo, de modo geral, é um meio de relacionar um produto (output) que se pretende determinar com algo conhecido que entra no sistema (input).

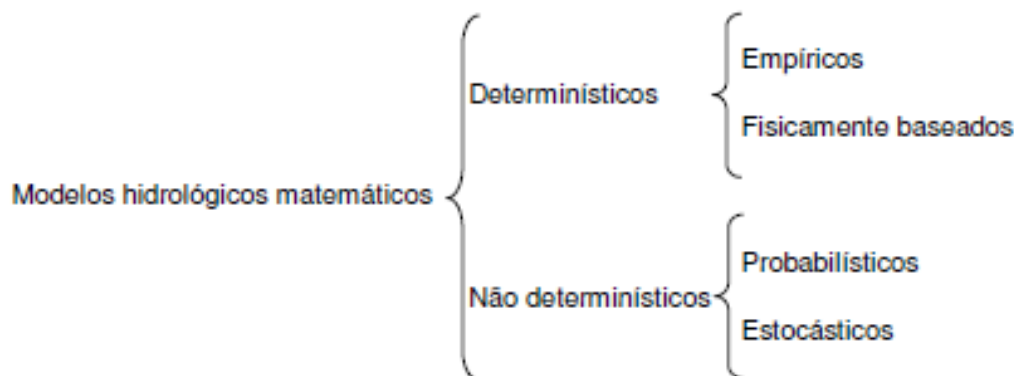


Figura 3.3-Classificações dos modelos hidrológicos matemáticos (Quintela & Portela, 2002)

A figura 3.3 representa a organização proposta por (Quintela & Portela, 2002) após estudarem o desenvolvimento da modelação hidrológica em Portugal para os últimos 25 anos do século XX. Os autores sugerem também a seguinte descrição para cada um dos modelos:

- **Modelos determinísticos ou não determinísticos:** os modelos são determinísticos se uma dada ação, uma variável de entrada, implicar uma mesma resposta, ou seja, uma variável de saída. Os parâmetros e processos do modelo devem ser considerados livres de variação aleatória e conhecidos com clareza. Se tal resposta é aleatória o modelo é necessariamente um modelo não determinístico. No âmbito dos **modelos determinísticos** referem-se modelos destinados à análise de cheias, à simulação de escoamentos fluviais e à modelação de segmentos limitados do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. No domínio dos modelos **não determinísticos** destacam-se modelos de acontecimentos extremos (cheias, precipitações intensas e secas) e modelos para simulação de escoamentos fluviais e para dimensionamento e gestão de albufeiras.
- Os modelos não determinísticos podem ser agrupados em dois grupos: **probabilísticos**, quando as variáveis intervenientes têm um comportamento puramente aleatório e é ignorada a sequência temporal ou espacial (geográficas) dos valores dessas variáveis, e **estocásticos**, quando para além da componente aleatória, têm uma outra que permite contemplar a sequência temporal ou espacial dos valores das variáveis (Quintela & Portela, 2002).
- Dentro dos modelos determinísticos, estes podem **empíricos** ou **fisicamente baseados**(conceptuais): os modelos empíricos baseiam-se na relação entre os dados de entrada e saída, procurando estabelecer uma relação causa-efeito, sem representar explicitamente o processo de conversão. Por outro lado, os modelos fisicamente baseados, muitas vezes designados de conceptuais, procuram reproduzir as leis físicas que regem os fenómenos. O estabelecimento deste modelo pressupõe conhecimentos base dos processos físicos pertinentes na transformação das variáveis de entrada em variáveis de saída.

Na descrição destes modelos presente no Manual Técnico do HEC-HMS os modelos fisicamente baseados ou conceptuais podem-se ainda subdividir em agregados, distribuídos ou semi-distribuídos. Esta subdivisão está relacionada com as variações espaciais (geográficas) das características e da bacia

em estudo. Nos **modelos agregados** (ou localizados) as variações das características e dos processos são ignoradas ou então são utilizados valores médios; nos modelos **distribuídos** essas variações são consideradas de forma explícita e discriminada; nos modelos **semi-distribuídos** as variações espaciais são realizadas através da divisão da bacia em várias sub-bacias. Comparativamente com os outros dois modelos, o modelo semi-distribuídos tem uma base física mais completa do que a modelo agregado e exige uma menor quantidade de dados de entrada no sistema em relação ao modelo distribuído (Feldman, 2000).

No caso dos modelos determinísticos é ainda possível distinguir entre modelos de **eventos** ou **contínuos**: os modelos de eventos simulam eventos isolados, com duração de poucas horas a poucos dias; os modelos contínuos simulam períodos mais longos, prevendo o comportamento do sistema durante e entre eventos. Esta distinção é independente e pode ser feita quer se tratem de modelos empíricos ou fisicamente baseados (conceptuais). Isto é, a questão de se um modelo é agregado ou distribuído é uma questão espacial. No entanto, esse mesmo modelo pode ser caracterizado por modelo contínuo ou evento pois trata-se de uma dimensão temporal. Este tipo de modelos aplica-se sobretudo a modelos que simulam processos de escoamento em bacias hidrográficas (Feldman, 2000).

Os modelos descritos anteriormente ainda podem ser caracterizados, de uma forma independente, de modelos de **parâmetros medidos** ou **modelos de parâmetros ajustados**: os modelos de parâmetros medidos são modelos cujos parâmetros podem ser determinados através das características e propriedades do sistema, por medição direta ou por métodos indiretos baseados em medições; os modelos de parâmetros ajustados incluem parâmetros que não podem ser medidos, sendo determinados apenas por ajuste do modelo (calibração) com dados observados de entrada (input) e de saída (output) (Feldman, 2000; Mendes, 2017)

Os *softwares* que permitem simular o comportamento de uma bacia hidrográfica utilizam modelos matemáticos que caracterizam cada um dos processos hidrológicos (infiltração, evapotranspiração, escoamento superficial e subterrâneo, etc.), presentes no ciclo hidrológico de numa dada bacia.

O quadro 3.1 apresenta a relação entre os modelos matemáticos utilizados no programa de simulação hidrológica HEC-HMS (ver 3.4.6) e a sua classificação segundo as diferentes categorias anteriormente apresentadas. Neste programa, a simulação hidrológica é realizada com base em 4 componentes, nomeadamente: i) o volume total de escoamento gerado pela precipitação; ii) o escoamento subsuperficial e o escoamento à superfície do terreno; iii) o escoamento de base e iv) o escoamento ao longo das linhas de água.

Quadro 3.1- Modelos matemáticos determinísticos utilizados pelo programa HEC-HMS na simulação de processos hidrológicos. ME-modelo de eventos; MC-modelo contínuo; E-empírico; A-agregado; D-distribuído; PM-parâmetros medidos e PA-parâmetros ajustados; extraído de (Mendes, 2017)

Componentes	Modelos matemáticos (ou métodos)	Classificação dos modelos matemáticos							
		ME	MC	E	C	A	D	PM	PA
Volume total de escoamento (runoff-volume)	Número de escoamento do SCS	x		x		x			x
	Número de escoamento do SCS – opção modelo distribuído	x		x			x		x
	Equação de Green e Ampt	x		x		x			x
	Inicial e taxa constante	x		x		x			x
	Deficit e taxa constante		x	x		x			x
	Quantidade de água no solo (SMA)		x	x		x			x
	Quantidade de água no solo (SMA) – opção modelo distribuído		x	x			x		x
Escoamento subsuperficial e escoamento à superfície do terreno (direct-runoff)	Hidrograma Unitário definido pelo utilizador	x		x		x			x
	Hidrograma Unitário de Clark's	x		x		x			x
	Hidrograma Unitário de Snyder's	x		x		x			x
	Hidrograma Unitário de SCS	x		x		x			x
	Hidrograma Unitário de ModClark	x		x			x		x
	Onda Cinemática	x			x	x		x	
Escoamento de base (baseflow)	Constante mensal	x		x		x		x	
	Regressão exponencial	x		x		x		x	
	Reservatório linear	x		x		x		x	
Escoamento nas linhas de água (routing)	Onda cinemática	x			x	x			x
	Atraso (Lag)	x		x		x		x	
	Puls modificado	x		x		x		x	
	Muskingum	x		x		x		x	
	Muskingum-Cunge (secção padrão)	x			x	x			x
	Muskingum-Cunge (secção 8 pontos)	x			x	x			x
	Confluência		x		x				x
	Bifurcação		x		x				x

3.4.APLICAÇÃO DA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA À ANÁLISE DE CHEIAS

3.4.1.COMPONENTES DE UM HIDROGRAMA

De um modo geral, o caudal que se verifica numa dada secção de um curso de água, não provém diretamente e na sua totalidade, dos eventos de precipitação que ocorreram sobre a bacia hidrográfica. Nesse sentido, ao analisar um hidrograma num curso de água natural podem ser consideradas as seguintes componentes principais do escoamento:

Escoamento Direto

Escoamento Base

Na generalidade dos eventos pluviométricos, principalmente nos que ocorrem após um intervalo significativo sem precipitação, verifica-se que decorre algum tempo até que se observe o aumento do escoamento na rede de drenagem da bacia hidrográfica, causado pela precipitação que atinge a bacia. O

facto de não se verificar um aumento da superfície livre significa que a precipitação caída sobre a bacia não esta a contribuir diretamente para o aumento do escoamento, fundamentalmente, devido à intercepção por obstáculos (vegetação e outros), ao armazenamento da água nas irregularidades e depressões da superfície e à infiltração no solo, aumentando o teor de humidade deste último (Portela, 2006).

O intervalo de tempo que decorre entre os instantes em que se inicia a precipitação e o instante em que se observa o aumento do escoamento (ou seja, a cota da superfície no curso de água começa a subir) depende, entre os outros fatores, como geológicos, topográficos e de coberto vegetal, do défice de humidade na bacia hidrográfica em relação às condições de saturação, isto é, do estado da bacia hidrográfica, anteriormente à ocorrência da chuvada e da própria intensidade de precipitação (Portela, 2006).

A contribuição da precipitação para o aumento de caudal escoado no curso de água tem início quando o défice de humidade na bacia hidrográfica se anula, ou seja, quando a camada de solo imediatamente junto da superfície fica saturada ou quando essa camada é impermeável (Portela, 2006).

No seguimento de ocorrência de precipitação, o caudal que se escoar no curso de água, antecedendo aquela precipitação, representa o escoamento de base e o acréscimo de caudal que se verifica no curso de água como resultado de precipitação, o escoamento direto (Portela, 2006).

Segundo (Lencastre, A., Franco, 2010), numa bacia hidrográfica não intervencionada (sem reservatórios), o escoamento de base provém, neste caso, do esgotamento das reservas subterrâneas, dependendo do armazenamento disponível nestas reservas que, por sua vez, depende das características morfológicas, fisiográficas e geológicas da bacia e das condições antecedentes de ocorrência de precipitação.

Numa análise mais rigorosa, para além dos escoamentos direto e de base, ainda se pode considerar uma outra componente no hidrograma de cheia observado numa secção de um curso de água em função da ocorrência de uma precipitação intensa sobre a respetiva bacia. Essa componente designa-se por escoamento intermédio e corresponde à água que se infiltra, mas que escoar a pouca profundidade no terreno, devido à existência de substratos impermeáveis mais profundos, ou de um sistema de drenagem artificial enterrado, voltando a aparecer à superfície sem que tenha atingido um aquífero. Em certos estudos é também conhecido como escoamento hipodérmico ou subsuperficial (Portela, 2006).

Na figura 3.5 estão representadas de uma forma mais detalhada as componentes do ciclo hidrológico de forma a perceber a formação das componentes referidas no parágrafo anterior.

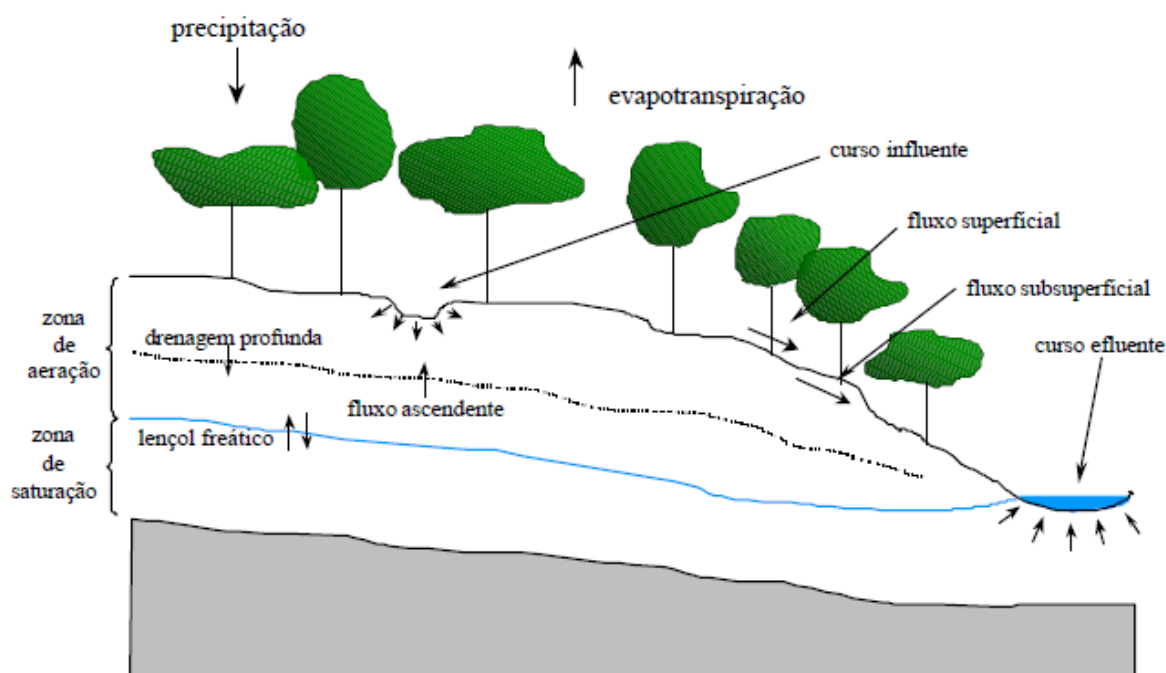


Figura 3.5-Componentes do ciclo hidrológico extraído de (Rennó & Soares, 2000)

De referir que, na ocorrência de eventos de pluviosidade de grande intensidade, a contribuição do escoamento de base para o hidrograma de cheia observado é pouco significativa, embora posteriormente, nos períodos de ausência de precipitação relativamente longos, passe a representar a totalidade do escoamento observado (Lencastre, A., Franco, 2010).

A figura 3.6 ilustra as componentes do hidrograma na sua forma mais genérica.

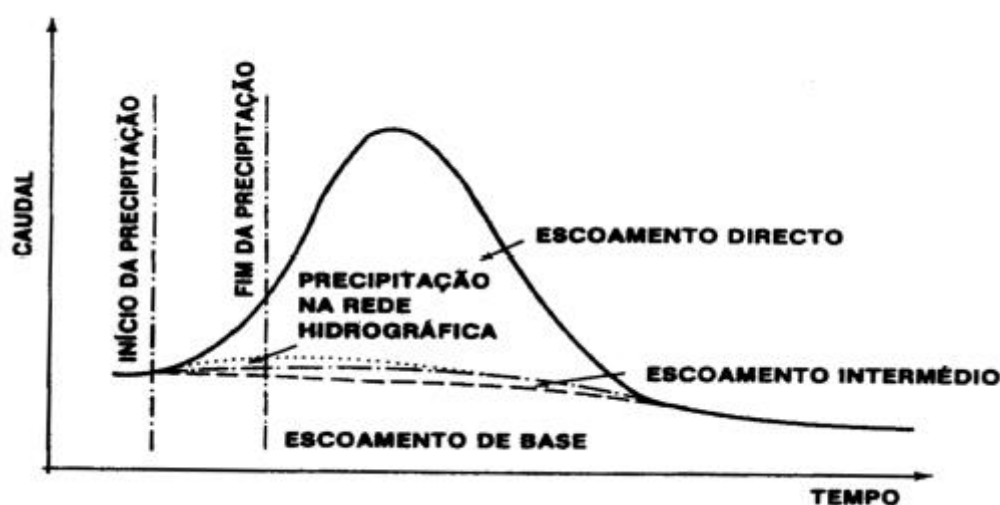


Figura 3.6-Componentes de um hidrograma (Lencastre, A., Franco, 2010)

Face a um hidrograma de cheia observado, é necessário proceder à separação dos escoamentos direto e de base de modo a identificar as parcelas representativas de cada escoamento com o intuito, por exemplo, de estimar parâmetros do modelo de análise de cheias.

Em síntese, a formação de escoamento direto, numa dada bacia, irá depender das características (geológicas, topográficas, presença de vegetação, etc.) dessa bacia e da presença ou ausência da precipitação, entre outros fatores. Se num intervalo de espaço de tempo existirem vários eventos de precipitação ou existir um evento pluvioso excecional é propício à formação de escoamento direto com maior facilidade, atendendo às condições da bacia. Por outro lado, no mesmo intervalo de tempo, se existir um evento pluvioso após um período seco, a formação do escoamento direto irá ser mais demorada podendo mesmo não chegar a se verificar formação de escoamento.

3.4.2.FORMA DO HIDROGRAMA E FATORES CONDICIONANTES

Um hidrograma tipo, registado após uma chuvada isolada ocorrida na respetiva bacia hidrográfica, tem geralmente a forma de uma campânula assimétrica, onde podem ser consideradas quatro partes distintas (Lencastre, A., Franco, 2010):

- Curva de Crescimento, corresponde ao aumento de caudal motivado pelo incremento do escoamento, e que ocorre durante o tempo de crescimento ou tempo para a ponta, t_p .
- Ponta do Hidrograma, isto é, o respetivo valor máximo do escoamento.
- Curva de Decrescimento, corresponde à diminuição progressiva do escoamento direto, e que ocorre durante o tempo de decrescimento, t_d .
- Curva de Esgotamento, corresponde ao decréscimo exponencial do escoamento base, depois de terem cessado as contribuições das restantes componentes do escoamento superficial.

A soma dos tempos de crescimento e decrescimento corresponde ao tempo base do hidrograma, t_b .

Algumas das definições a que importa atender na interpretação deste mesmo hidrograma, e porque são alvo de caracterização por parte de alguns modelos das diferentes componentes do escoamento superficial, são seguidamente apresentadas (Lencastre, A., Franco, 2010):

- Tempo de resposta da bacia hidrográfica (lag), t_l , corresponde ao intervalo de tempo definido pelos instantes correspondentes ao centro de gravidade da precipitação útil e à ponta do hidrograma.
- Tempo de Precipitação Útil, t_r , tempo durante o qual ocorre a fração útil da precipitação, isto é, a que origina o escoamento direto.
- Tempo de Concentração de uma bacia hidrográfica, t_c , tempo necessário para que toda a sua área contribua para o escoamento superficial na secção de saída ou, reformulando, o tempo necessário a que uma gota de água caída no ponto hidraulicamente mais distante chegue à secção de saída. É uma característica da bacia, não dependendo da natureza do evento de precipitação (duração ou intensidade).
- Tempo de Esvaziamento da rede hidrográfica, t_e , tempo que medeia entre a ocorrência do ponto de inflexão na curva de decrescimento, e a cessação do escoamento direto. Corresponde à passagem na secção do volume de água armazenada na rede durante a chuvada. Depende das características geométricas dos canais da rede, mas também da tipologia da precipitação.

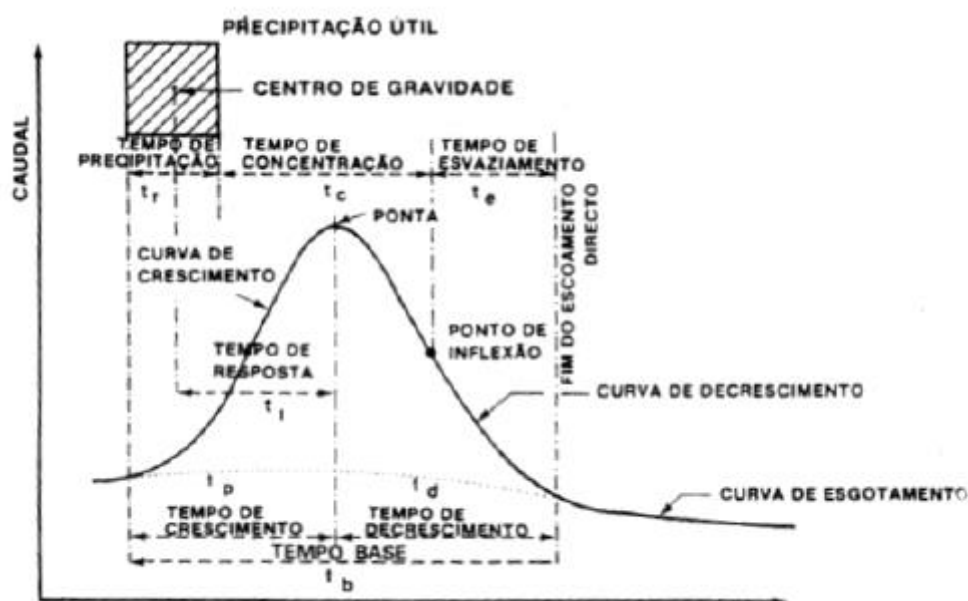


Figura 3.7-Características de um hidrograma tipo extraído de (Lencastre, A., Franco, 2010)

De forma sucinta, a forma do hidrograma está associada às características quer topográficas e geológicas da bacia hidrográfica, quer da precipitação. Os fatores topográficos que influenciam o armazenamento da precipitação útil e por consequência o escoamento superficial são, fundamentalmente, a área e a forma da bacia hidrográfica, a densidade da rede fluvial, os declives do terreno e das linhas de água, assim como as obstruções, no terreno ou no próprio leito, que provocam retenção. As características geológicas têm influência no escoamento intermédio e de base. Relativamente à precipitação, as características que determinam as diferentes respostas da bacia são a intensidade, duração e distribuição.

3.4.3.PRECIPITAÇÃO ÚTIL E A MODELAÇÃO DAS PERDAS DE PRECIPITAÇÃO

A precipitação útil ou efetiva corresponde à parcela da precipitação que contribui para o escoamento observado. O volume provocado por essa parcela corresponde ao escoamento direto originado na secção que define a bacia.

A diferença entre a precipitação total e a precipitação efetiva designa-se por perda de precipitação. Tal como referido no início do presente capítulo, os processos envolvidos nas perdas são a interceção, a infiltração, o armazenamento em depressões do solo e a evapotranspiração.

A perda por interceção refere-se à parcela da precipitação que é intercetada pela vegetação ou por qualquer outro obstáculo. A quantidade de precipitação retida depende das características da precipitação (frequência de ocorrência e valor, intensidade e duração) e da natureza da cobertura do terreno. O tipo, a densidade e extensão da a vegetação, entre outros fatores, são fatores condicionantes da cobertura do terreno (Gomes, 2008; Portela, 2006).

Segundo (Ponce, 1989), as perdas anuais de precipitação podem representar 25% da precipitação anual média. No entanto, a parcela de precipitação intercetada durante os eventos de grande precipitação é pouco significativa, sendo assim o seu impacto muito reduzido na ocorrência de grandes cheias fluviais, dependendo da excecionalidade da ocorrência.

A infiltração corresponde à passagem da água que atravessa o solo para o subsolo. A infiltração depende, entre outros fatores, das características do solo, tipo, granulometria, densidade do coberto vegetal, temperatura e qualidade da água. Na ocorrência de eventos extremos a infiltração é o processo de perda de precipitação com maior impacto na determinação do hidrograma de cheia. (Portela, 2006).

O armazenamento em depressões do terreno engloba a parcela retida nas irregularidades, naturais ou artificiais do solo que existem à superfície do terreno. Embora esta parcela possa ser evaporada ou infiltrada representa uma perda do volume efetivo (Portela, 2006).

A evapotranspiração é processo que representa a totalidade de água evaporada na bacia hidrográfica e transpirada pela vegetação. Segundo (Portela, 2006) as perdas de precipitação por evapotranspiração, no contexto do clima em Portugal, são desprezáveis no decorrer dos eventos pluviosos. O estudo desta parcela assume importância quando se pretende determinar escoamento fluvial na ausência de precipitação.

Num dado modelo hidrológico, a importância da consideração dos processos que resultam das perdas de precipitação depende dos objetivos desse mesmo modelo. Em modelos de eventos, como são o de análises de cheias, são consideradas as perdas iniciais, com destaque para a infiltração, desprezando os restantes processos. Em modelos de simulação contínua, cujo objetivo é a simulação de escoamentos diários, estando na presença ou não de precipitação, é necessário considerar, para além das perdas de precipitação, as parcelas relativas à infiltração e evapotranspiração.

Os modelos mais utilizados para a determinação das perdas de precipitação e, conseqüentemente, da precipitação efetiva são o “método do índice” também designado por “método de perdas de intensidade constante” e o **modelo do SCS (Soil Conservation Service)**.

Segundo (Portela, 2006), o método do índice considera uma perda de intensidade constante, para um dado evento pluvioso, calcula as perdas de precipitação através do volume do escoamento direto. Deste modo, pressupõe que é possível obter o hidrograma do escoamento direto com base no hidrograma originado pelo aquele evento. No entanto, na maioria das aplicações, verifica-se a ausência de dados relativos ao escoamento direto pelo que a estimativa das perdas da precipitação torna-se um dado requerido do sistema, sendo necessário a utilização de outros métodos. Nesses casos é necessário aplicar outros modelos, sendo mais frequentemente utilizados, o método do número de escoamento SCS.

O Método do Número de Escoamento do SCS permite calcular o volume total de escoamento gerado através da precipitação. Como referido anteriormente, apenas uma fração da precipitação total que ocorre numa bacia hidrográfica gera escoamento direto designando-se de precipitação efetiva, útil ou excesso de precipitação. A restante parte que não contribui diretamente para a formação de escoamento direto designa-se por perdas de precipitação. Nesse sentido, o método do número de escoamento é considerado como um modelo de perdas de precipitação (Feldman, 2000).

Esse método encontra-se descrito com maior pormenorização no anexo B.

Com as perdas caracterizadas é possível, através de métodos que irão ser abordados de seguida, simular os processos que originam o escoamento direto com base na precipitação efetiva.

3.4.4. MODELOS PARA SEPARAÇÃO DO ESCOAMENTO DIRETO E DO ESCOAMENTO DE BASE

A separação de todas as componentes anteriormente consideradas no escoamento superficial é complexa e de difícil realização. São diversos os métodos para proceder à separação dos escoamentos direto e de base. O procedimento mais usual remete para a curva de recessão do escoamento de base (Portela, 2006). Tal curva é frequentemente apresentada pela equação:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{\frac{t-t_0}{k}} \quad (1)$$

em que Q_0 corresponde ao caudal proveniente do esgotamento dos aquíferos no instante t_0 , $Q(t)$ é o caudal no intervalo $(t-t_0)$ após Q_0 ter ocorrido e k é a constante de recessão ou de esgotamento que se exprime em unidades de tempo. Por aplicação de logaritmos à anterior equação, obtém-se a equação 2:

$$\ln Q(t) = \ln Q_0 - \frac{t - t_0}{k} \quad (2)$$

Que pressupõe que a representação da variação de caudal com o tempo num gráfico semi-logarítmico é linear.

A tradução física da equação 1, que melhor a representa, é admitir que o caudal com origem nas reservas subterrâneas pode ser aproximado pela descarga de um conjunto de reservatórios linear sucessivos, sendo considerado um reservatório linear quando o caudal efluente deste é proporcional ao volume armazenado do mesmo (Portela, 2006).

Na figura 3.8 ilustra-se o método de curva de recessão de uma forma simplificada onde a área a preto corresponde ao escoamento de base, que diminui exponencialmente desde o instante inicial. A área a branco representa o escoamento direto e a soma das duas parcelas corresponde ao escoamento total na linha de água.



Figura 3.8-Hidrograma com a representação da recessão do escoamento de base inicial extraído de (Mendes, 2017)

A constante de recessão, k , numa dada secção de um curso de água pode ser estimada com base em hidrogramas de cheia observados. A representação gráfica semi-logarítmica de um hidrograma observado revela um andamento em forma de segmento de reta nos períodos com ausência de precipitação e afastados da ocorrência anterior de escoamento superficial, ou seja, em período de esgotamento dos aquíferos da bacia hidrográfica.

3.4.4.1. Modelo de Escoamento de Base

O programa de simulação hidrológica utilizado no desenvolver desta dissertação é o HEC-HMS (ver 3.4.6). O programa não utiliza métodos para a separação do escoamento direto e do escoamento de base. O HEC-HMS apenas permite calcular essas duas componentes separadamente. Relativamente ao cálculo de escoamento de base, os modelos mais conceptuais na utilização do HEC-HMS são:

- Constante mensal;
- Regressão exponencial
- Reservatório linear

O mais usual para simular a drenagem subterrânea existente das massas de água é a regressão exponencial, também designado por método de recessão que consiste no modelo de recessão exponencial do escoamento de base descrito anteriormente, e pode ser traduzido na seguinte expressão:

$$Q(t) = Q_0 \cdot K_{HEC}^t \quad (3)$$

Em que: Q_0 representa o caudal no instante inicial da simulação; K_{HEC} é a constante de recessão ou decaimento exponencial e $Q(t)$ é o caudal proveniente do escoamento de base no instante t .

Este método é adequado para representar o comportamento típico observado em bacias quando o caudal na linha de água diminui exponencial depois do evento.

Como referido, a constante de recessão, K_{HEC} , pode ser estimada com base em hidrogramas de cheia observados. Se existirem registos de caudais na secção de referência da sub-bacia, pode ser estimado um valor aproximado analisando a relação entre o valor do escoamento num determinado dia, anterior ao início do evento de precipitação, e os valores nos dias anteriores. Sendo a constante uma razão terá valores compreendidos entre 0 e 1. Na ausência ou na presença de dados insuficientes a constante de recessão poderá ser obtida por via de calibração. Esse parâmetro será descrito com maior detalhe numa fase posterior, aquando a aplicação do modelo de alerta de cheias ao caso de estudo (Mendes, 2017; Portela, 2006).

O caudal no instante inicial da simulação, Q_0 , é considerado um parâmetro inicial do método e pode ser obtido através de uma monitorização em tempo-real (Mendes, 2017).

Em cada simulação, o programa requer a indicação explícita do caudal inicial, bem como a de um outro caudal, no ramo descendente do hidrograma de cheia a que atribui a designação de limiar (designado também por relação ao pico). A recessão do escoamento de base tem lugar a partir de Q_0 até ao instante de ocorrência daquele caudal limiar. Para instantes posteriores, o programa considera que a forma do hidrograma total é dada pela curva de recessão que, para o feito é aplicada a partir do caudal limiar. O correspondente escoamento de base é então avaliado de modo indireto, subtraindo ao escoamento total definido pela curva de recessão o escoamento direto que o programa vai sucessivamente obtendo, mediante a aplicação dos modelos que, para o efeito tenham sido previamente indicados (Portela, 2006).

Nas seguintes figuras são apresentados dois esquemas do método aqui descrito. A figura 3.9 corresponde ao método de recessão aplicado a um evento de precipitação e a figura 3.10 representa o método aplicado a mais de um evento de precipitação.

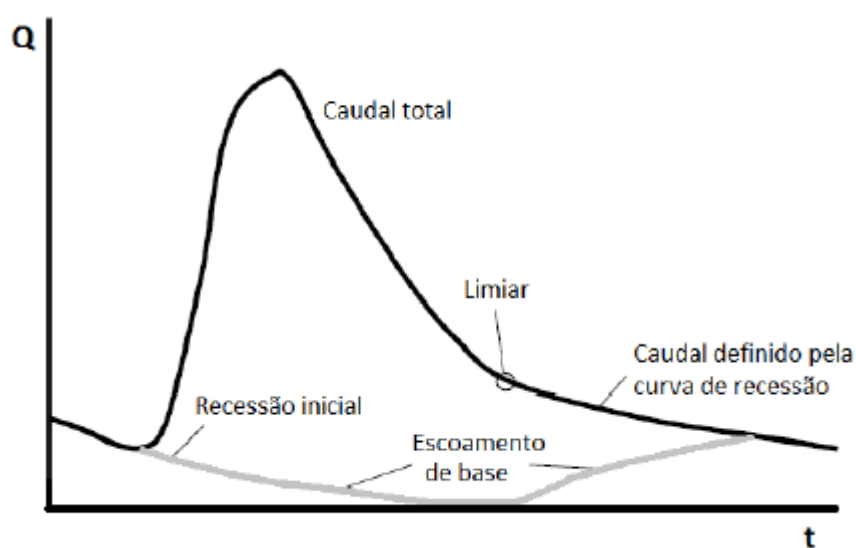


Figura 3.9-Ilustração do método de recessão aplicado a um evento de precipitação extraído de (Mendes, 2017)

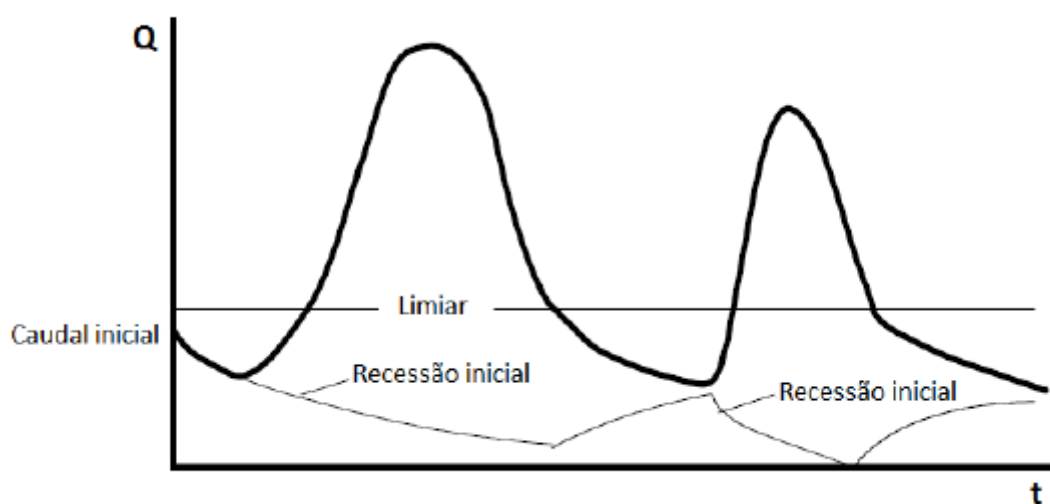


Figura 3.10-Ilustração do método de recessão aplicado a mais de um evento de precipitação extraído de (Mendes, 2017)

No capítulo 5, referente à aplicação do modelo ao caso de estudo, será descrito com maior detalhe os parâmetros envolvidos na aplicação deste modelo ao caso de estudo.

3.4.4.2. Modelo de Escoamento Direto

Os modelos, frequentemente mais utilizados, que permitem simular a transformação da precipitação efetiva em escoamento direto são:

- Modelo do Hidrograma Unitário
- Modelo da Onda Cinemática

O modelo do hidrograma unitário, considerado um modelo empírico, procura estabelecer uma relação casual entre a precipitação efetiva e o escoamento direto. Existe limitações relativamente aos parâmetros e equações que o constituem, sendo mesmo necessário de recorrer à calibração para obter uma otimização (Feldman, 2000; Gomes, 2008).

O modelo da onda cinemática é considerado um modelo conceptual e procura representar mecanismos físicos que governam o movimento do excesso de precipitação (precipitação efetiva) sobre a superfície e em canais coletores da bacia hidrográfica (Miller, 1984).

Na presente dissertação irá ser abordado com maior ênfase o modelo da onda cinemática. Este modelo, apesar de exigir uma maior quantidade de informação das suas superfícies de escoamento e respetivos canais coletores, representa uma maior aproximação da realidade da bacia hidrográfica.

Modelo da Onda Cinemática

Apesar de o modelo do hidrograma unitário seja frequentemente aplicado com sucesso, verifica-se uma dificuldade em associar propriedades físicas de uma bacia aos parâmetros requeridos ao desenvolvimento desse hidrograma. Esta lacuna torna-se mais evidente quando, por exemplo, para além da total ausência de dados relativos à bacia em causa acresce a falta de caudais observados, obrigando deste modo à realização de uma extensa calibração (Singh, 2001).

As principais particularidades do modelo da onda cinemática são:

- i. Permite adaptar às diferentes realidades que compõem uma bacia hidrográfica, mesmo que em constante alteração.
- ii. Para propósitos de modelação do escoamento não permanente sobre a superfície de uma bacia hidrográfica, imaginar-se-ia um modelo com grandes requisitos em termos de parâmetros que se ajustassem às complexidades de tal movimento. O modelo da onda cinemática relaciona as características de uma bacia hidrográfica e do seu escoamento com dois parâmetros, α e m .
- iii. A sua solução recorre a métodos numéricos que aproximam a resposta ao comportamento dos fluidos na bacia hidrográfica. É necessário a introdução de algumas simplificações matemáticas dada a complexidade de um sistema de drenagem.

Segundo (Maidment, 1993) o modelo da onda cinemática provou ser bastante fiável e objeto de grande precisão para pequenas bacias (30km^2), no que respeita às duas vertentes: escoamento à superfície e escoamento em canal. No entanto, atualmente é aplicado a todo o tipo de bacias independentemente da sua dimensão. No anexo B é descrito com mais detalhe o modelo em questão.

3.4.5. PROPAGAÇÃO DE HIDROGRAMAS DE CHEIA EM TRECHOS DE CANAL

Neste subcapítulo são apresentados os modelos de propagação em canal presentes no programa de simulação, HEC-HMS, capazes de simularem um hidrograma de jusante em canal aberto tendo como base um hidrograma de montante.

Os modelos presentes no programa de simulação são:

- Modelo do Tempo de Resposta (lag);
- Modelo de Puls;
- Modelo da Onda Cinemática;
- Modelo de Muskingum;
- Modelo de Muskingum-Cunge;
- Straddle Stagger;

Os modelos de Muskingum e de Muskingum-Cunge são, geralmente, os mais utilizados para a propagação de ondas de cheia em canais. O modelo de Muskingum-Cunge trata-se de uma continuidade

do modelo de Muskingum e surge com objetivo de dar resposta a algumas limitações presentes no primeiro modelo. No anexo B encontra-se descrito ao detalhe o método referido, assim como os parâmetros envolventes.

Devido á constante variação de alguns parâmetros ao longo do tempo, o HEC-HMS resolve o método de Muskingum-Cunge numericamente, mediante a aplicação de algoritmos de cálculo.

3.4.6. PROGRAMAS DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA

A simulação hidrológica pode ser aplicada com diversas finalidades. No âmbito desta dissertação, é aplicada a simulação hidrológica, com base num modelo numérico de precipitação/escoamento, de modo a desenvolver um modelo de alerta de cheias em obra a ser utilizado na execução do aproveitamento hidroelétrico do Fridão.

São vários os programas de simulação hidrológica, produzidos por agências governamentais, universidades e empresas privadas, que oferecem diversas opções para os processos de simulação, diferentes níveis de complexidade e graus de apoio técnico e formação (Parker, 2017). No quadro seguinte é apresentado uma série de programas que permitem, segundo as características descritas, simular o escoamento superficial numa escala temporal inferior ao diário, podendo ser da ordem ou até mesmo do minuto (Beckers, Smerdon, & Wilson, 2009)

Quadro 3.2-Programas com escala temporal sub-diária, extraído de (Mendes, 2017)

Designação do programa	Entidade
CRHM - <i>Cold Regions Hydrologic Model</i>	<i>University of Saskatchewan</i>
DHSVM - <i>Distributed Hydrology Soil Vegetation Model</i>	<i>University of Washington</i>
HEC-HMS - <i>Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modelling System</i>	<i>US Army Corps of Engineers</i>
HSPF - <i>Hydrologic Simulation Program-Fortran</i>	<i>U.S. Geological Survey - Environment Protection Agency</i>
HydroGeoSphere	<i>University of Waterloo and Laval University</i>
MIKE-SHE	<i>DHI Water & Environment</i>
MODHMS	<i>HydroGeoLogic Software Systems</i>
SSARR - <i>Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation</i>	<i>US Army Corps of Engineers</i>
WaSiM-ETH - <i>Wasserhaushalts-Simulations-Modell</i>	<i>Eidgenössische Technische Hochschule</i>
WATFLOOD	<i>University of Waterloo</i>
VIC - <i>Variable Infiltration Capacity</i>	<i>University of Washington</i>

Embora exista uma vasta quantidade de programas de simulação hidrológica, a escolha de um programa de simulação para a aplicação na previsão de cheias, deve obedecer a um processo de análise cautelosa/criteriosa. A aplicação deste tipo de programas depende do objetivo da simulação, bem como das capacidades técnicas dos utilizadores, de fatores geográficos e ambientais, entre outros.

O programa de simulação hidrológica a utilizar na realização deste estudo é o HEC-HMS devido à sua versatilidade na escolha dos modelos a integrar e à sua frequente utilização por parte da EDP Produção. A EDP Produção tem vindo a utilizar versões deste *software* para caracterizar modelos hidrológicos com diversas finalidades, seja para dimensionamento dos órgãos de exploração e de segurança dos aproveitamentos hidroelétricos (AH), durante a fase de projeto, seja para a mitigação dos efeitos de

eventuais cheias na fase de construção dos AH ou até para a gestão das albufeiras durante o período de exploração desses AH.

HEC-HMS

O programa HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*) é um programa de simulação hidrológica, de domínio público, desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* do *US Army Corps of Engineers* e surge como uma atualização do HEC-1, bastante utilizado pela APA e pela EDP (EDP, 2011; Feldman, 2000).

Este programa permite simular os processos de precipitação-escoamento em bacias hidrográficas com escala temporal horária, transformando a precipitação ocorrida numa bacia em escoamento superficial. Na figura 3.3 estão representados os processos hidrológicos que o HEC-HMS normalmente se baseia na obtenção do escoamento superficial.



Figura 3.3-Processos envolvidos na formação do escoamento superficial, extraído de (Mendes, 2017).

Dependendo do objetivo da aplicação, o programa apresenta algumas simplificações nos processos hidrológicos considerados. Tendo como objetivo, numa fase inicial, a simulação de eventos de cheia, os métodos envolvidos restringem-se à previsão do escoamento superficial nas linhas de água, simplificando as componentes do escoamento subterrâneo (Beckers et al., 2009).

Geralmente e de modo a simplificar a sua aplicação, o programa considera apenas a presença de uma camada de solo, onde se gera o escoamento subsuperficial, e um aquífero (elemento que representa o reservatório de águas subterrâneas), onde se gera o escoamento de base, desprezando o armazenamento e o movimento vertical entre esses dois elementos. Para as situações em que é necessário a quantificação dessas componentes, o programa inclui o modelo matemático designado por *Soil Moisture Accounting* (SMA) em que considera três reservatórios interligados: um destinado ao armazenamento do escoamento subsuperficial e dois reservatórios inferiores destinados ao armazenamento subterrâneo (Mendes, 2017).

4

**CASO DE ESTUDO E ELEMENTOS
BASE**

No presente capítulo é realizada uma descrição da bacia hidrográfica do rio Tâmega, assim como dos aproveitamentos hidroelétricos existentes e dos previstos executar, dando-se especial ênfase ao AH de Fridão, para o qual se pretende definir um modelo de alerta de cheias em obra. É ainda efetuada uma descrição dos dados hidrometeorológicos utilizados na definição do modelo referido.

4.1. BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TÂMEGA

O rio Tâmega, último grande afluente da margem direita do rio Douro, tem a sua origem em Espanha, na Serra de S.Mamede, cerca da cota (980 m). O seu curso desenvolve-se ao longo de uma extensão de cerca de 185 km, até atingir o rio Douro junto à localidade de Entre-os-Rios aproximadamente à cota (5,0 m) (EDP, 2011). A figura 4.1 mostra a localização da bacia do rio Tâmega.

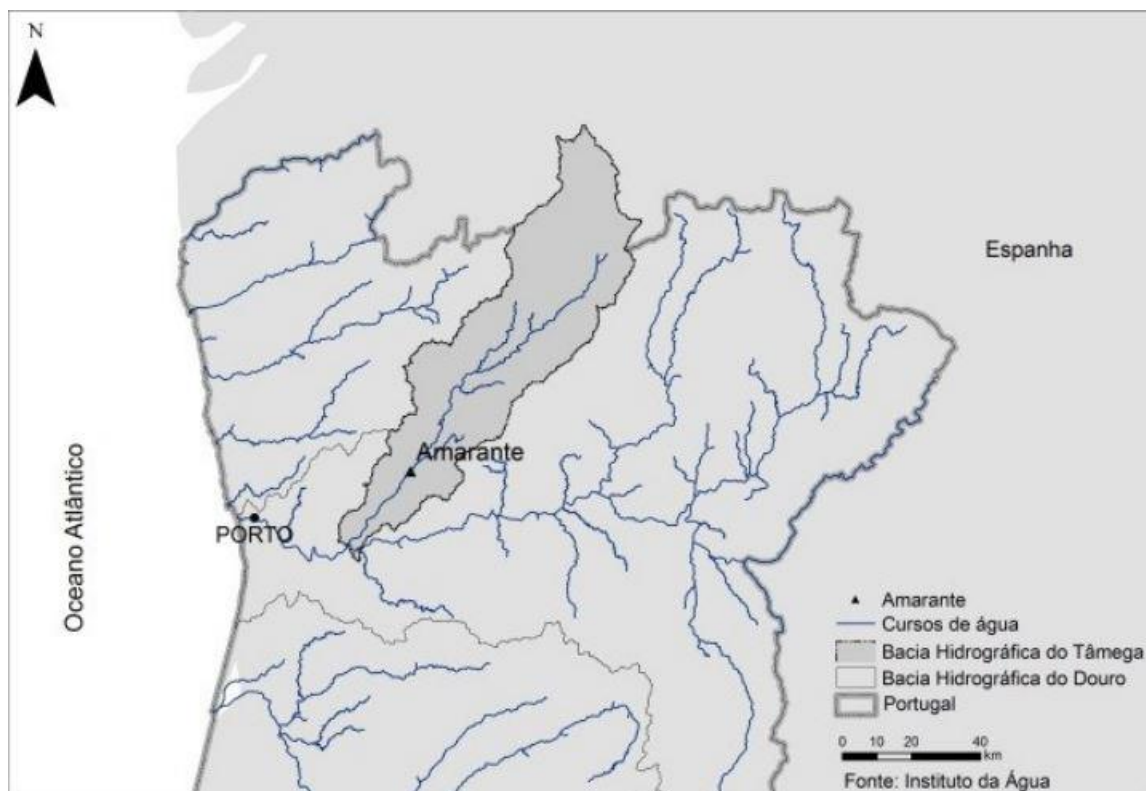


Figura 4.1-Localização da bacia hidrográfica do Tâmega (SNIRH, 2018)

A bacia hidrográfica, de forma alongada, com uma largura média de cerca de 20 km, tem uma área total de aproximadamente 3300 km² (dos quais cerca de 2650 km em território nacional) e é limitada a leste pelas bacias dos rios Tua e Corgo, a oeste pelas bacias dos rios Cávado, Ave e Sousa e a norte, em território espanhol, pela bacia do rio Minho (EDP, 2011).

Na figura 4.2 é apresentado o levantamento hipsométrico da bacia hidrográfica do rio Tâmega, sendo também assinaladas as povoações com maior destaque e os rios que drenam a bacia.

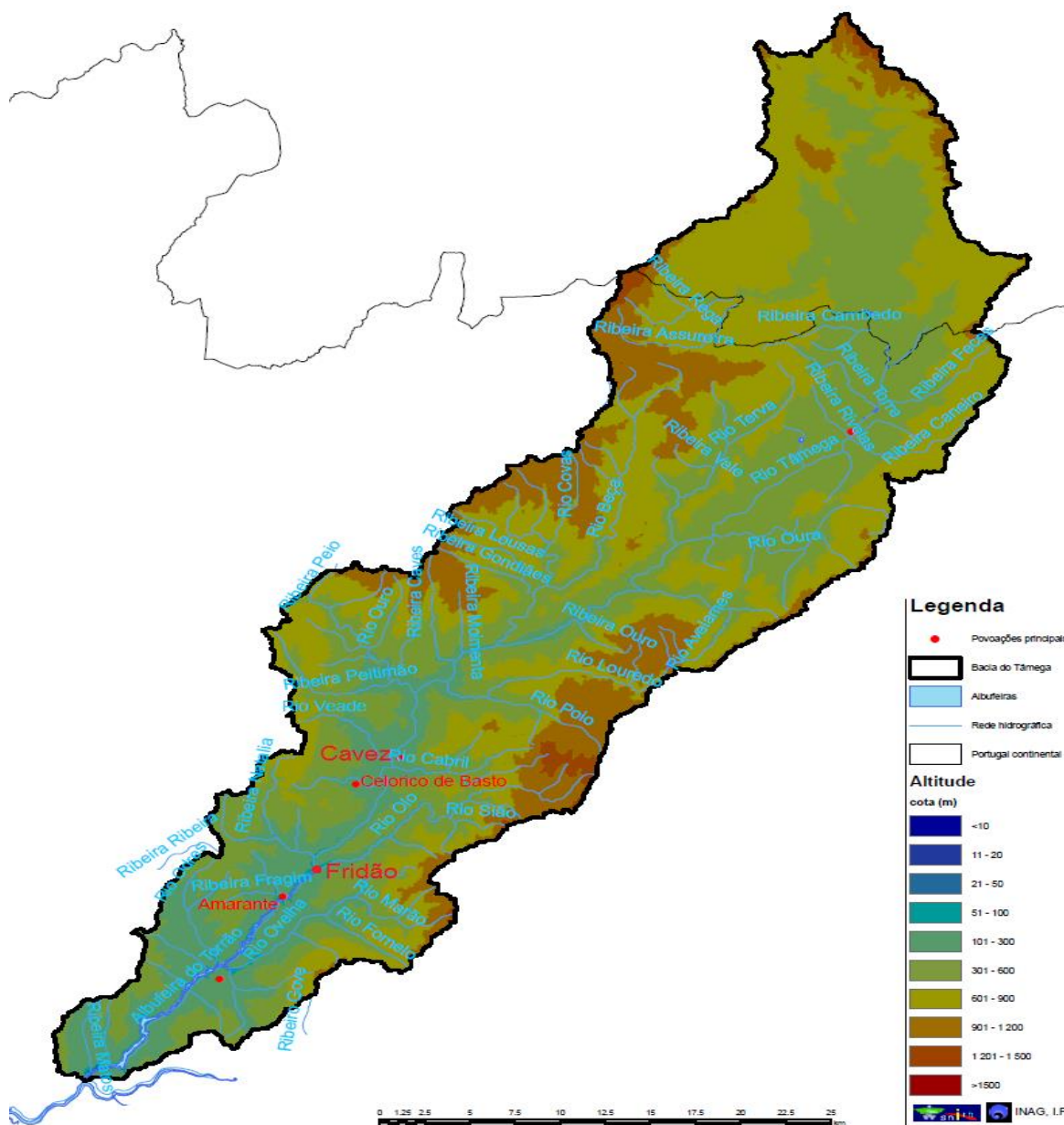


Figura 4.2- Caracterização do levantamento hipsométrico da bacia do rio Tâmega, os rios que a constituem e as principais povoações extraído de (SNIRH, 2018)

Em relação à ocupação do solo e recorrendo à informação contida na carta de usos do solo do projeto Corine-Land Cover observa-se que (EDP, 2011; SNIRH, 2018):

- existe bastante ocupação agrícola e grandes manchas de florestas em toda a zona dos vales das principais linhas de água;
- a vegetação é predominantemente arbustiva, nas zonas mais altas, existindo zonas praticamente desprovidas de vegetação.
- Relativamente à ocupação urbana, para além das pequenas povoações dispersas, existem cidades bastante desenvolvidas e urbanizadas com destaque para Chaves e Amarante.

No que diz respeito ao clima, segundo a classificação de Koppen (figura 4.3), Portugal está englobado no tipo Cs, ou seja, clima temperado húmido com Verão seco. Esta categoria divide-se em duas regiões: uma de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e quente (Csa) e outra de clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente (Csb). A divisão das duas regiões faz-se pela isotérmica dos 22°C no mês mais quente do ano. A bacia do Tâmega, integra a zona Csa (a laranja), figura 4.3 (EDP, 2011; IPMA, 2018b).

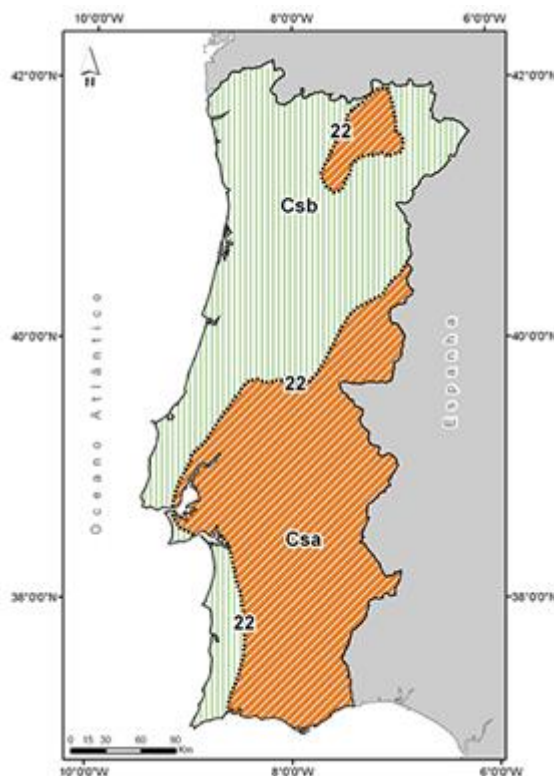


Figura 4.3-Clima de Portugal Continental, segundo a classificação de Koppen (IPMA, 2018b)

O objeto de estudo desta dissertação é uma sub-bacia da referida bacia do Tâmega, situada entre as secções das EH de Ponte de Cavez e de Fridão, mais adiante caracterizadas. Nesta bacia intermédia o rio Tâmega é o curso principal, tendo como principais afluentes os rios Veade e Cabril e a Ribeira de Santa Natália. Esta sub-bacia será afetada com a entrada em funcionamento de AH que estão a ser realizados e/ou se pretendem realizar e que irão regularizar os escoamentos afluentes da zona da bacia situada a montante desses aproveitamentos. A figura 4.4 ilustra os AH de prevista realização (Fridão, Alto Tâmega, Daivões e Gouvães) e o já existente (Torrão) situados na bacia do Tâmega, juntamente com as estações hidrométricas da EDP Produção. Esses aproveitamentos e os já existentes serão descritos nos próximos subcapítulos com maior detalhe.

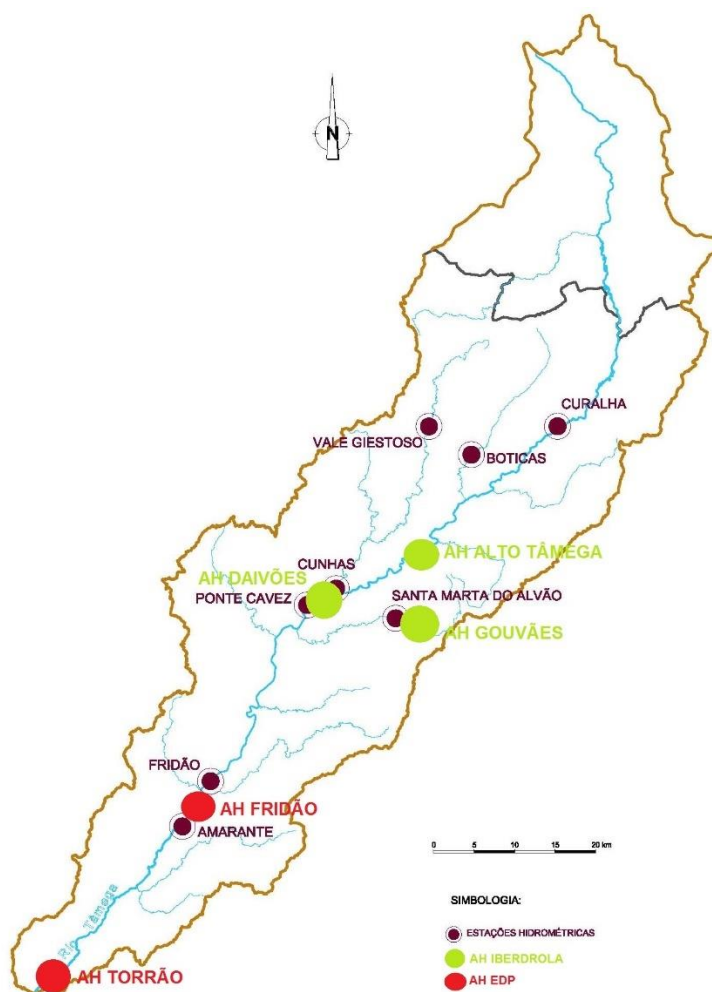


Figura 4.4-Localização dos AH sobre a bacia do Tâmega

4.2.APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS EXISTENTES

4.2.1.APROVEITAMENTO DE TORRÃO

O AH do Torrão (Figura 4.5) localiza-se no rio Tâmega, a cerca de 3,5 km da sua confluência com o rio Douro, e a 40 km do Porto. Entrou em funcionamento em 1988 e atualmente é gerido pela EDP Produção.

Este aproveitamento, situado em Torrão, concelho de Marco de Canavezes, distrito do Porto, compreende uma barragem com 70 m de altura e 218 m de desenvolvimento de coroamento. Este aproveitamento dá origem a uma albufeira com o Nível de Pleno Armazenamento (NPA) fixado à cota 65,00 m, que inunda uma superfície na ordem dos 650 ha. A sua albufeira abrange os concelhos de Marco de Canavezes, Penafiel e Amarante.



Figura 4.5-Barragem de Torrão extraído de (EDP, 2018a)

O AH é constituído por uma barragem do tipo gravidade aligeirada, dotada de descarregador de cheias de superfície de cinco vãos, equipados com comportas segmento, circuito hidráulico, central, edifício de comando local e subestação.

A central, implantada a cerca de 150 m a jusante da barragem, é equipada com dois grupos geradores do tipo Francis reversíveis, com potências nominais unitárias de 70 MW e 80 MW, respetivamente. Este aproveitamento tem uma produtividade média anual é de 222,3 GWh (EDP, 2018a).

4.3.APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS FUTUROS

Em 2007, Portugal era visto como um dos países da União Europeia com maior potencial hídrico por explorar e com maior dependência energética do exterior. Face a esta situação, em dezembro do mesmo ano foi aprovado pelo governo a criação de um Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH) com o objetivo de aproveitar o potencial hidroelétrico nacional ainda por explorar (APA, 2007).

Com a implementação deste programa foi possível identificar, de entre um leque de 25 potenciais aproveitamentos hidroelétricos, quais os principais investimentos a efetuar de forma a obter uma capacidade instalada nacional superior a 7000 MW em 2020 e, consequentemente, uma redução de 54% para 33% do potencial hídrico por aproveitar (APA, 2007).

A escolha dos aproveitamentos incluídos no programa teve em conta a capacidade de produção de energia, da otimização dos recursos da bacia hidrográfica em que se inserem e do potencial para satisfação de outros usos, tendo-se considerado que apresentavam condições de viabilidade técnica, económica, social e ambiental (APA, 2007; I.P., REN, COBA, PROCESL, & DGEG, 2007).

A figura 4.6 apresenta os aproveitamentos selecionados, no ano de 2007, no âmbito do PNBEPH.



Figura 4.6 – Aproveitamentos que constituem o PNEBPH (adaptado de (APA, 2007)).

No âmbito do PNEBPH, em 2007, ficou estabelecido a construção de cinco AH na bacia do Tâmega, representando mais de 50% do objetivo estabelecido pelo programa, correspondendo a uma potência máxima total superior a 1300 MW. Os AH de Alto Tâmega, Padroselos, Daivões e Gouvães constituem o Sistema Electroprodutor do Tâmega (SET) e sua concessão foi atribuída à empresa IBERDROLA GENERACIÓN, S.A.U. No rio Tâmega estarão situadas as albufeiras de Alto Tâmega e Daivões e, em dois dos seus afluentes, Beça e Torno/Louredo, as albufeiras de Padroselos e Gouvães, respetivamente. Mais situado a jusante desse conjunto de AH, estará previsto a construção do AH de Fridão, situado no rio Tâmega, sendo a EDP a entidade responsável pela sua construção e exploração.

Numa fase inicial, o SET era constituído pelos cinco AH destinados à bacia do Tâmega, porém, na realização do concurso público em que foram atribuídas as suas concessões a diferentes entidades, a Iberdrola denomina atualmente por SET o conjunto dos quatro AH referidos. Nos próximos subcapítulos serão descritos os AH referidos.

4.3.1. APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE FRIDÃO

O AH de Fridão, previsto para o rio Tâmega, cerca de 33 km a montante do aproveitamento do Torrão, será constituído por uma barragem principal, a montante, e por uma barragem não equipada, a jusante, junto à confluência com o rio Olo, destinada apenas à regularização de caudais turbinados de modo a garantir condições de escoamento compatíveis com os usos de ocupação humana (Figura 4.7).

A albufeira do AH Fridão, com uma extensão de cerca de 35 km, abrange território dos concelhos de Amarante (distrito do Porto), Celorico de Basto e Cabeceiras de Basto (distrito de Braga) e Mondim de

Basto e Ribeira de Pena (distrito de Vila Real). A albufeira da barragem de jusante estende-se desde um local a montante da foz do rio Ôlo, até à barragem de Fridão, e tem aproximadamente 4,2 km de extensão, abrangendo apenas território dos concelhos de Amarante e Celorico de Basto (EDP, 2011).



Figura 4.7-Localização dos elementos, escalão principal e barragem a jusante, constituintes do aproveitamento de Fridão (adaptado de (EDP, 2018b)).

Numa fase inicial do Anteprojecto foi realizado uma reavaliação, nas vertentes técnicas, económica e ambiental, de um conjunto de soluções técnicas consideradas mais interessantes. Neste contexto, ficou definido um NPA à cota 160 m para albufeira do escalão principal, e um NPA à cota 86 m para a barragem de jusante (EDP, 2011).

Os principais elementos constituintes do escalão principal são:

- Barragem abóbada em betão, com o coroamento à cota (162 m) e uma altura máxima de 98 m, na qual estão inseridos o descarregador de cheias ($4000 \text{ m}^3/\text{s}$), equipado com comportas, tipo lâmina livre com a estrutura de entrada localizada na parte central do corpo da barragem, e uma descarga de fundo ($230 \text{ m}^3/\text{s}$);
- Circuito hidráulico subterrâneo, implantado na margem direita do rio Tâmega, e a central em poço, equipada com um grupo gerador não reversível dimensionado para o caudal de $350 \text{ m}^3/\text{s}$.

A barragem de jusante tem como elementos constituintes:

- Barragem do tipo gravidade, em betão, adaptada na maior parte da sua extensão a descarregador de cheias ($4100 \text{ m}^3/\text{s}$) equipado com comportas;
- Descarga de fundo, destinada à regulação dos caudais a lançar para jusante, e por um dispositivo para descarga de caudais ecológicos (EDP, 2011).

A figura 4.8 ilustra um esquema da constituição do aproveitamento de Fridão:

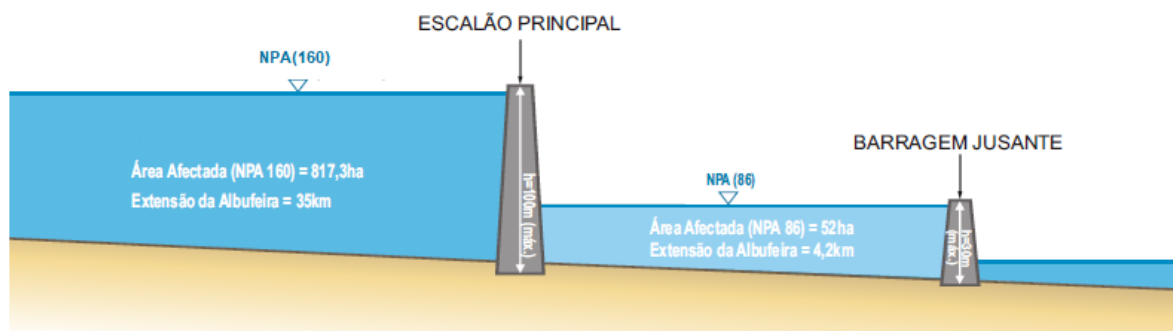


Figura 4.8 – Ilustração esquemática do aproveitamento de Fridão (extraído de ((EDP, 2009)).

As figuras 4.9 e 4.10 ilustram a planta referente ao escalão principal e à barragem a jusante, respetivamente:

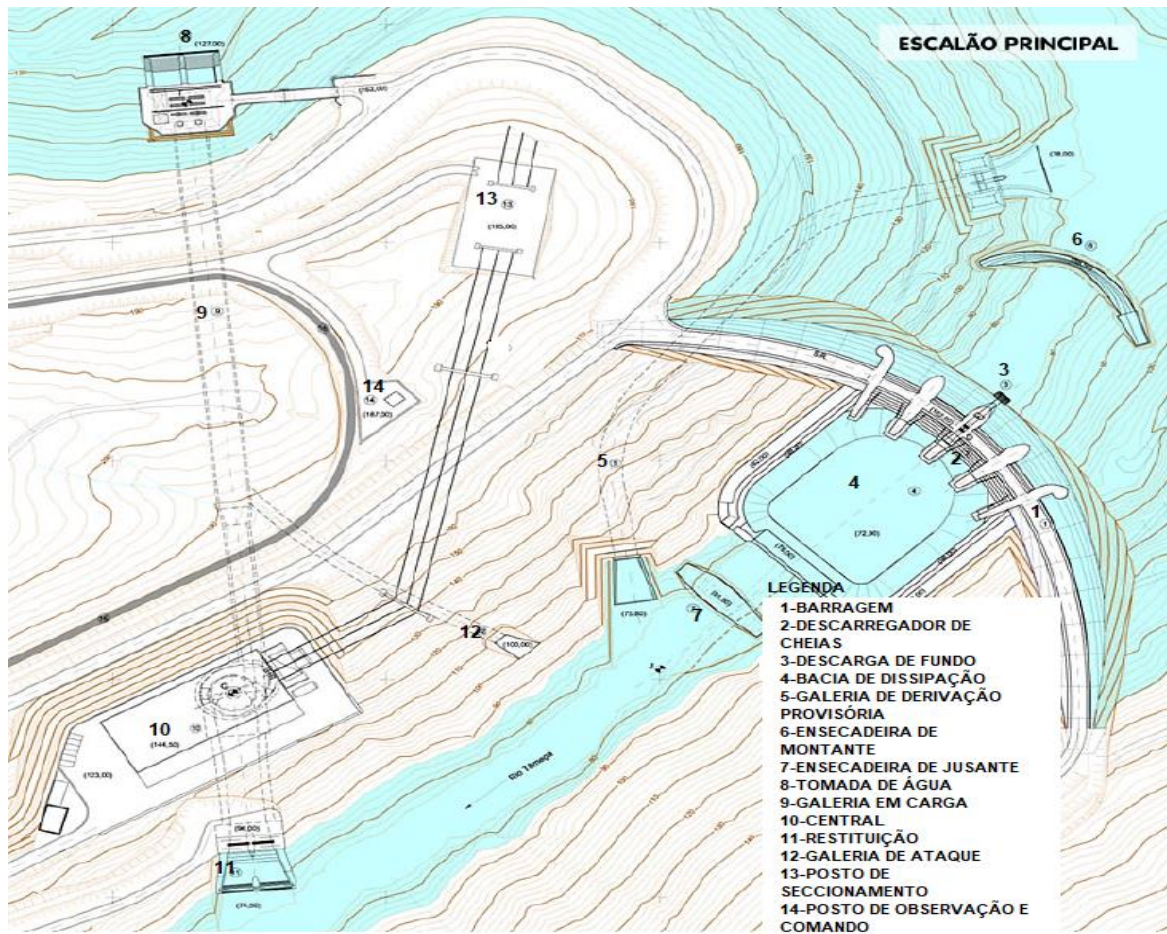


Figura 4.9-Planta geral do escalão principal do aproveitamento de Fridão, adaptado de (EDP, 2011).

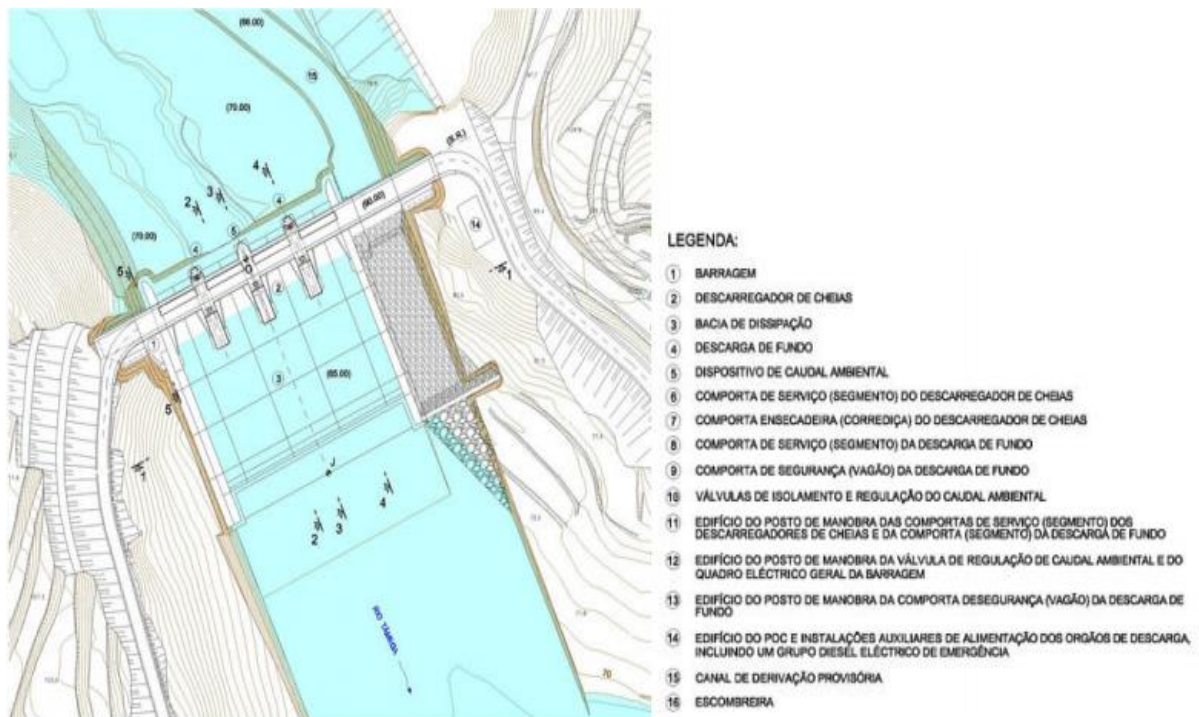


Figura 4.10-Planta geral da barragem a jusante do aproveitamento de Fridão (EDP, 2011).

Relativamente à derivação provisória (escalão de montante) a solução adotada é constituída por ensecadeiras de montante e jusante, implantadas de modo a delimitar a zona do leito do rio onde decorrerão os trabalhos de construção da barragem e da bacia de dissipação, e uma galeria de derivação, inserida na margem direita.

O caudal de dimensionamento da galeria de derivação (caudal máximo a derivar), corresponde ao valor que pode ser igualado ou excedido, em média, cerca de uma semana por ano. Com base na curva de caudais médios diários classificados definida para o local, fixou-se esse valor em 400 m³/s.

Este valor irá ser preponderante para a definição de um modelo de alerta de cheias e irá ser abordado mais aprofundadamente no capítulo seguinte.

4.3.2. SISTEMA ELECTROPRODUTOR DO TÂMEGA

No âmbito do PNBEPH, estava prevista a realização de quatro AH no SET (Alto Tâmega, Daivões, Gouvães e Padroselos). No entanto, apenas após a realização do concurso publico que atribuiu à Iberdrola a construção e concessão desses AH, foi descoberta uma importante população de bivalves com elevado estatuto conservacionista que levantou questões ambientais e levaram à exclusão do projeto do AH de Padroselos.

No projeto em que constava a realização do aproveitamento de Padroselos estava previsto a instalação de 2 grupos reversíveis em Padroselos, Alto Tâmega e Daivões e a instalação de 3 grupos reversíveis no aproveitamento de Gouvães.

De forma a assegurar a potência prevista do SET e a efetiva melhoria da segurança do mercado electroprodutor é necessário garantir um valor de potência reversível de cerca de 900 MW, pelo que num cenário de não construção de Padroselos, a correspondente potência prevista deverá de ser assegurada pelo aproveitamento de Gouvães. Será, então, necessário instalar um quarto grupo de geração reversível nesta central e aumentar a potencia dos grupos de Alto Tâmega e, portanto, de caudal, de forma a permitir o arranque dos grupos reversíveis de Gouvães pelos grupos de geração do Alto Tâmega (Iberdrola, 2010, 2017).

Nas figuras seguintes são apresentadas, respetivamente, a localização dos aproveitamentos e das correspondentes centrais (Figura 4.11), e um esquema ilustrativo de cada aproveitamento, com indicação do NPA, do tipo de central e a potência instalada (Figura 4.12). Segue-se uma breve apresentação mais detalhada de cada um dos três aproveitamentos.

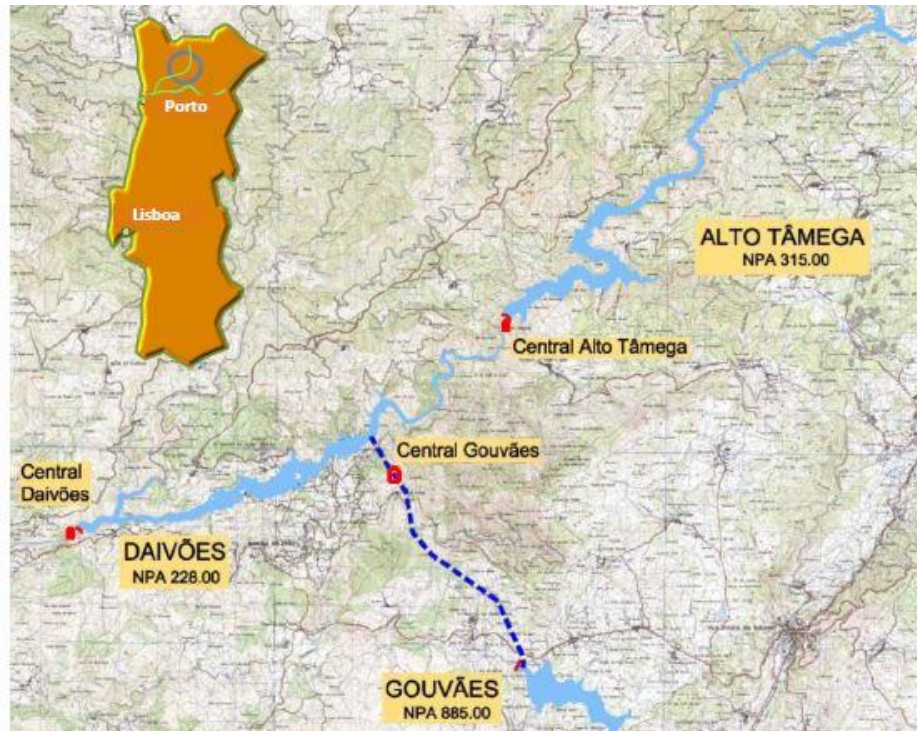


Figura 4.11-Localização dos aproveitamentos e identificação do Nível Pleno de e Armazenamento extraído de (Iberdrola, 2017)

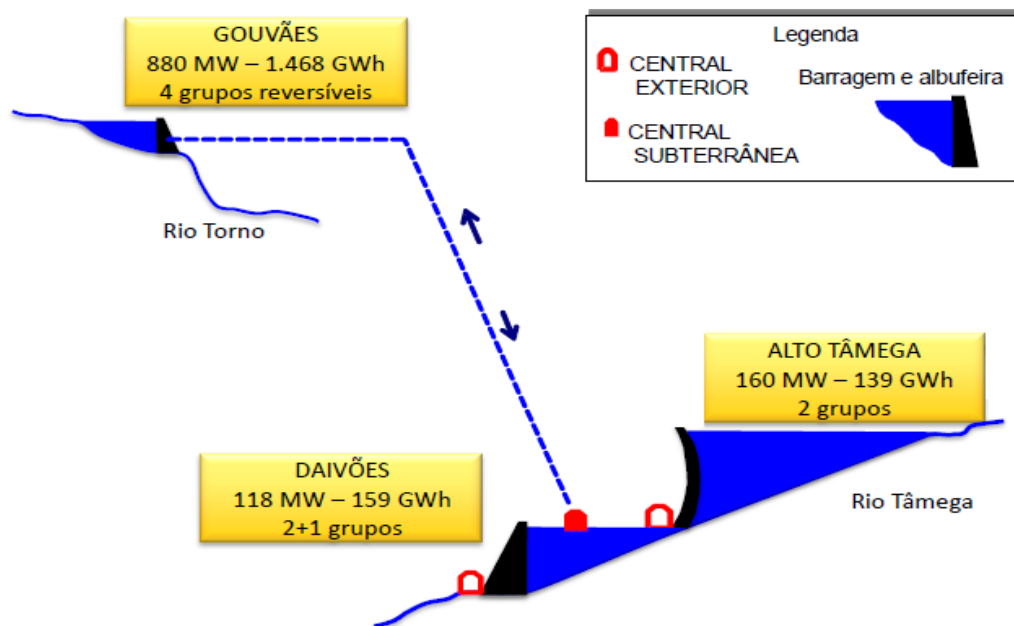


Figura 4.12-Ilustração de um esquema do conjunto de aproveitamentos e a potência instalada em cada aproveitamento adaptado de (Iberdrola, 2017).

4.3.2.1. Aproveitamento Hidroelétrico do Alto Tâmega

O AH do Alto Tâmega (Figura 4.13) localizar-se-á no curso principal do rio Tâmega e, dos três AH previstos no SET, é o que se situa mais a montante. A sua albufeira irá abranger os concelhos de Ribeira da Pena, Vila Pouca de Aguiar, Boticas e Chaves. Do conjunto de aproveitamentos, este é o que irá ter

uma maior dimensão com uma barragem do tipo abóbada em betão com uma altura máxima de 106,5 m, um comprimento do coroamento fixado em 334 m e uma bacia de dissipação com cerca de 98 m de comprimento. A albufeira gerada pelo aproveitamento tem uma superfície total de 470 ha e um comprimento máximo de 22,3 km. A central é do tipo pé de barragem com 2 grupos de 80MW cada um, estando previsto um caudal máximo de turbinamento de 200 m³/s (Iberdrola, 2010, 2017)



Figura 4.13-Esquema referente ao aproveitamento de Alto Tâmega extraído de (Iberdrola, 2017)

4.3.2.2. Aproveitamento Hidroelétrico de Gouvães

O AH Gouvães será implantado no rio Louredo, afluente da margem esquerda do rio Tâmega, e a sua albufeira, com um comprimento máximo de 3 km e uma superfície total de 176 há, irá afetar os concelhos de Ribeira da Pena e Vila Pouca de Aguiar. Este AH será constituído por uma barragem do tipo gravidade em betão com uma altura máxima de 30 m e 233 m de comprimento do coroamento, uma central subterrânea situada a 321 m de profundidade, equipada com 4 grupos reversíveis de 220 MW cada um e caudal total de turbinamento/bombagem de 160/120 m³/s e circuito hidráulico (Figura 4.14) constituído por um túnel de adução, uma chaminé de equilíbrio, conduta forçada e conduta de aspiração (Iberdrola, 2010, 2017).

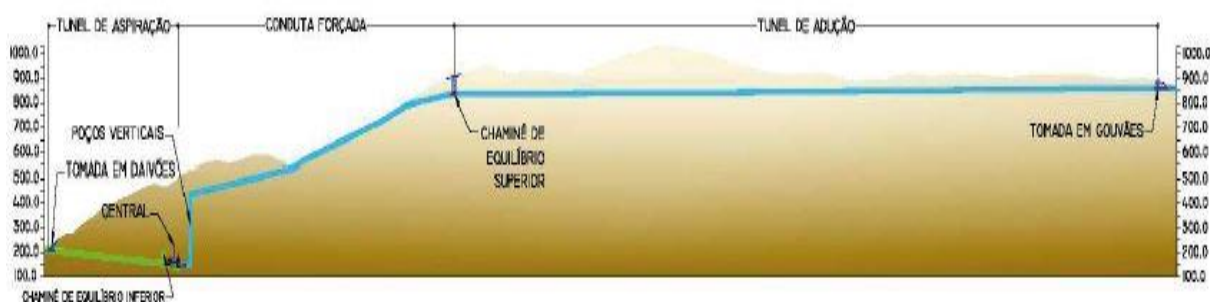


Figura 4.14-Constituição do circuito hidráulico do aproveitamento de Gouvães extraído de (Iberdrola, 2017)

4.3.2.3. Aproveitamento Hidroelétrico de Daivões

O AH de Daivões (figura 4.15) é o aproveitamento situado mais a jusante em relação aos restantes do SET, abrangendo concelhos como Ribeira de Pena, Vila Pouca de Aguiar e Cabeceiras de Basto. No seu projeto está prevista uma barragem em arco gravidade com uma altura máxima de 78 m, um comprimento do coroamento na ordem dos 265 m e uma bacia de dissipação de 98 m de desenvolvimento. A central ficará semienterrada na margem direita equipada e será equipada com 2 grupos de 57 MW cada e ainda um grupo adicional destinado ao turbinamento do caudal ecológico. Está previsto que o caudal máximo de turbinamento seja da ordem dos 220 m³/s. A albufeira, com um comprimento máximo de 16,5 km, tem uma superfície total de 340 ha. (Iberdrola, 2010, 2017)

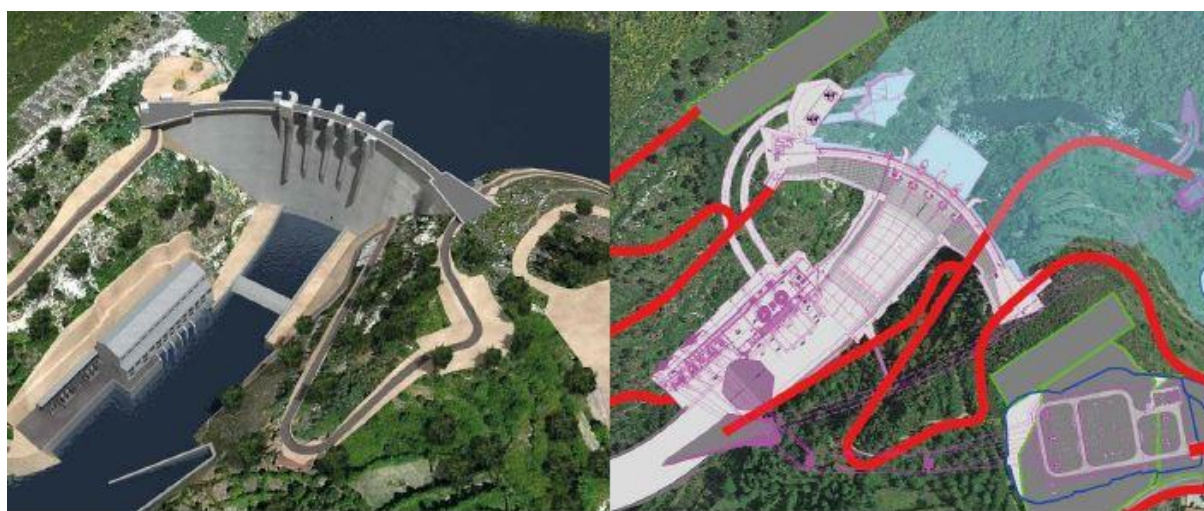


Figura 4.15-Esquema do aproveitamento de Daivões (extraído de ((Iberdrola, 2017))).

4.4. DADOS HIDROMETEOROLÓGICOS UTILIZADOS

Como referido anteriormente, a construção e entrada em funcionamento do SET irá ter como consequência a regularização de toda a bacia a montante do AH Daivões (aproveitamento de jusante). Assim, e para os objetivos deste estudo, será suficiente estudar, a nível hidrológico, a parte da bacia situada a jusante dessa secção, até à secção de implantação do aproveitamento de Fridão, isto é, a designada bacia intermédia, localizada entre os AH Daivões e Fridão (ver Fig. 4.6).

Entretanto, e de modo a construir o modelo que permita estabelecer um sistema de alerta de cheias em obra para o aproveitamento de Fridão tornou-se necessário estabelecer uma base de dados composta por dados hidrométricos e dados meteorológicos, o que é seguidamente abordado.

4.4.1. REDE HIDROMETEOROLÓGICA DO SNIRH

O Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) foi criado pelo Instituto da Água (INAG) em meados de 1995, com o objetivo de criar uma rede de monitorização, de acesso livre, composta por estações hidrometeorológicas convencionais e automáticas, algumas com teletransmissão. Este sistema tinha também como objetivo a criação de um portal capaz de divulgar sínteses mensais temáticas, visando a caracterização das disponibilidades hídricas nacionais, relatórios técnicos, cartografia sobre recursos hídricos (por exemplo zonas inundáveis), documentos técnicos e uma galeria de imagens relacionada com recursos hídricos (SNIRH, 2018).

A rede de monitorização de recursos hídricos esteve praticamente inoperacional desde 2010 até 2014, momento em que a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), atual responsável pelo SNIRH, terá aparentemente reiniciado o normal funcionamento e operação do sistema. Atualmente a APA, para além da rede de monitorização presente no SNIRH, dispõe de um sistema de informação designado por Sistema Nacional de Informação de Ambiente (SNIAmb) que serve como apoio ao desenvolvimento e avaliação das políticas de ambiente (APA, 2018; Saramago, 2017).

Esta ferramenta permite observar a distribuição das estações hidrométricas e estações meteorológicas referentes ao ano de 2017 (APA, 2018). As figuras 4.16 e 4.17 ilustram, respetivamente, a rede meteorológica e a rede hidrométrica existentes.

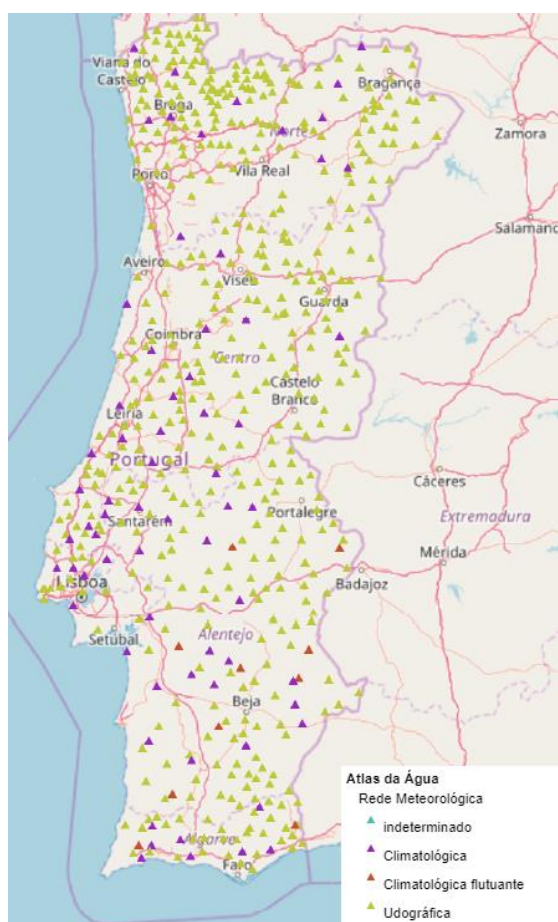


Figura 4.16-Estado da rede meteorológica em 2017 adaptado (APA 2018)

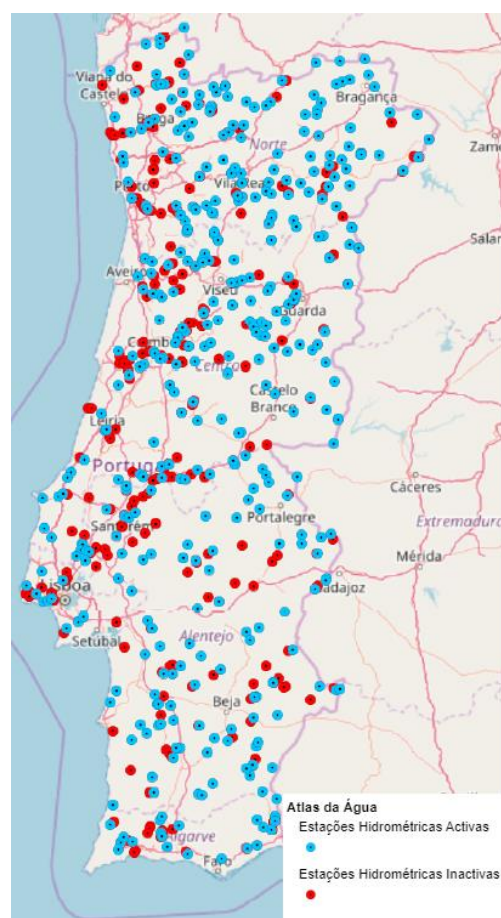


Figura 4.17-Estado da rede hidrométrica em 2017 adaptado de (APA 2018)

As redes hidrometeorológicas integram um conjunto de estações meteorológicas e estações hidrométricas. As estações meteorológicas para além da medição da precipitação, permitem medem outros fatores como velocidade e direção do vento, radiação, temperatura, humidade, entre outros. A medição de precipitação é feita através de udómetros ou pluviómetros. Designa-se estação hidrométrica uma secção de um troço fluvial onde se efetua um registo periódico de níveis, e onde se definiu uma curva de vazão para a conversão desses níveis (Conceição et al., 2014).

A rede de monitorização do SNIRH, para a bacia do rio Tâmega, inclui 32 estações com séries de dados disponíveis, em que 7 delas estão extintas ou desativadas, e das restantes, a maioria contém falhas em certos períodos e algumas já não são atualizadas há algum tempo. No anexo C está presente um quadro resumo das estações existentes na bacia do rio Tâmega em que consta o tipo de estação, o estado das estações, a data de encerramento (quando aplicável), entre outros parâmetros associados às mesmas. De salientar que, para o estudo a desenvolver neste trabalho, interessa obter registos de precipitação horária.

No que respeita à rede hidrométrica presente no portal público do SNIRH, em relação à bacia do Tâmega, verifica-se o registo de níveis hidrométricos e curva de vazão definida para a estação de Ermelo, situada no rio Olo. Estando localizada a jusante do AH de Fridão, não acrescenta valor para o estudo desenvolvido.

4.4.2. REDE HIDROMETEOROLÓGICA DA EDP PRODUÇÃO

A EDP possui uma rede de estações hidrometeorológicas localizada em locais de interesse estratégico para a empresa. Parte destes dados são enviados para a APA, sendo alguns deles disponibilizados ao público no portal do SNIRH.

A rede explorada pela EDP Produção teve origem em meados do século passado, quando a empresa Hidroelétrica do Douro decidiu explorar um conjunto de estações hidrometeorológicas, cujos registos, por exigência dos cadernos de encargos das concessões dos aproveitamentos hidroelétricos, eram fornecidos à Autoridade (Ferreira et al., 2017).

Sendo notória a importância da existência de dados de observação hidrometeorológica em quantidade e qualidade, verificou-se, com o passar dos anos, um crescimento gradual da rede, que, nos anos oitenta do século XX, era já constituída por cerca de uma centena de estações dotadas de equipamentos de medição convencionais (Ferreira et al., 2017).

Com o desenvolvimento tecnológico cada vez mais significativo, os registos passaram a ser eletrónicos facilitando a análise e tratamento. Deste modo, no fim do século passado, deu-se início à automatização das estações constituintes da rede hidrometeorológica, e sempre que possível, à sua dotação com teletransmissão. Esse processo durou até 2011 e, atualmente, praticamente todas as estações se encontram automatizadas e com monitorização em tempo real (Ferreira et al., 2017).

Atualmente, a EDP Produção explora um conjunto de 71 estações hidrometeorológicas, localizadas principalmente no norte e centro do país (Figura 4.18), das quais 50 são hidrométricas e as restantes meteorológicas. Destas últimas, a sua maioria apenas regista precipitações, havendo 3 com registos evaporimétricos.



Figura 4.18-Rede hidrometeorológica explorada pela EDP

São representadas na figura 4.19 as estações hidrométricas de posse da EDP Produção na bacia do rio Tâmega. De referir que, para a bacia em estudo, não se verifica a presença de estações meteorológicas.

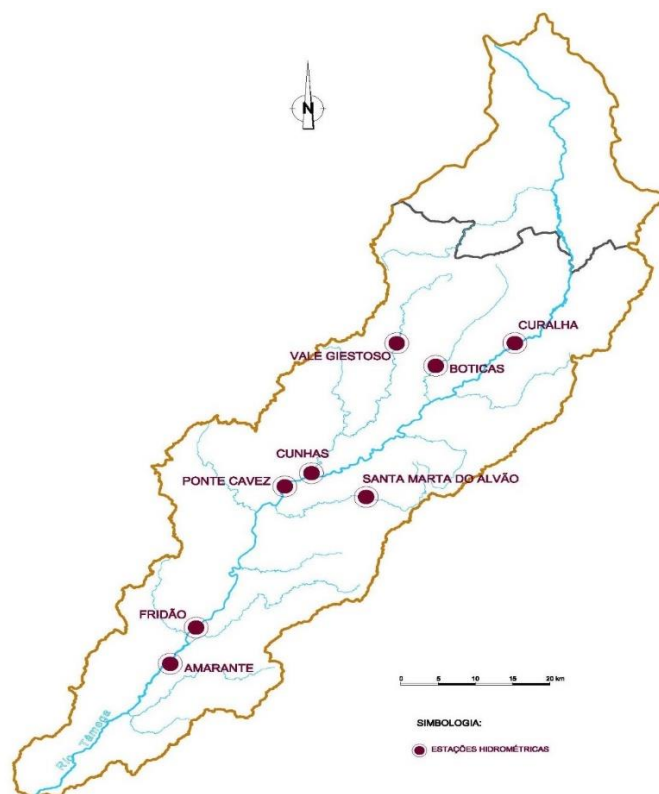


Figura 4.19-Estações hidrométricas situadas na bacia hidrográfica do rio Tâmega

A EDP Produção mantém em funcionamento, na bacia em causa, sete estações hidrométricas destinadas ao registo de caudais e uma (Amarante) destinada ao controlo de níveis. Desse conjunto de estações, 4 situam-se no troço principal do rio Tâmega (Curalha, Ponte Cavez, Fridão e Amarante) e as restantes em rios afluentes ao mesmo: as de Vale Giestoso e Cunhas, no rio Beça, a de Boticas, no rio Terva e a de Santa Marta do Alvão, no rio Louredo.

Deste conjunto de estações apresentadas na figura anterior, existem duas com uma particular relevância para a realização desta dissertação: a EH de Ponte Cavez, localizada cerca de 40 km a jusante do AH Daivões e a EH de Fridão, localizada cerca de 2,5 km a jusante do local de implantação do escalão principal do AH Fridão.

De seguida são apresentadas as principais características das duas referidas estações:

Estação Hidrométrica de Ponte Cavez

Situa-se no rio Tâmega, imediatamente a montante da ponte da estrada que liga Arco do Baúlhe a Vila Pouca de Aguiar.

- Coordenadas (WGS84): Latitude 41°30'52''N
Longitude 7°53'28''W
- Área da bacia hidrográfica: 1951 km²
- Cota zero da escala: 159,66 m
- Início de funcionamento: 03/12/1956
- Registo limnigráfico: 24/10/1957

Numa situação futura, com a entrada em funcionamento do SET, a estação de Ponte Cavez permitirá conhecer os caudais descarregados pelo conjunto dos correspondentes aproveitamentos. No âmbito da realização desta dissertação, a estação de Ponte Cavez assume o papel de estação hidrométrica de referência, pois permite conhecer os caudais afluentes à bacia intermédia.

Estação Hidrométrica de Fridão

Inicialmente, em 1985, esta estação foi instalada alguns metros a montante do local previsto para a barragem principal do aproveitamento de Fridão. No entanto, devido a constantes problemas de funcionamento foi alterada, em 1989, para um local cerca de 1,3 km a jusante de onde se encontrava.

- Coordenadas: Latitude 41°19'09''N
Longitude 81°02'01''W
- Área da bacia hidrográfica: 2567 km²
- Cota zero da escala: 73 m
- Início de funcionamento: 07/10/1985
- Registo limnigráfico: desde o início de funcionamento

No âmbito da realização desta dissertação, tal como a estação de Ponte Cavez, assume o papel de estação referência, pois, para além de permitir conhecer os caudais afluentes ao local de implementação do futuro AH, será utilizada no processo de calibração do modelo hidrológico.

Para a realização da presente dissertação foram fornecidos pela EDP Produção os seguintes dados referentes a caudais registados nas estações anteriormente mencionadas:

- Estação hidrométrica de Ponte Cavez: i) registos com intervalo de 30 minutos no período entre 01/10/2006 a 30/09/2010; ii) registos com intervalo de 15 minutos no período entre 01/10/2010 a 01/07/2017;

- Estação hidrométrica de Fridão: i) registos com intervalo de 30 minutos no período entre 01/01/2007 a 31/12/2008; ii) registos com intervalo de 15 minutos no período entre 01/01/2009 a 01/07/2017;

Os dados pluviométricos, disponíveis no portal público do SNIRH, referentes a estações situadas dentro e/ou na proximidade da bacia intermédia, traduzem a contribuição dessa bacia para o escoamento direto aquando a aplicação do programa de simulação HEC-HMS. De uma forma simplificada, essa contribuição da bacia intermédia, originada pela precipitação ocorrida para um dado período, adicionada aos caudais registados na estação hidrométrica de Ponte Cavez, corresponde aos caudais escoados na secção a jusante da bacia, em Fridão. A existência de dados hidrométricos nessa secção permitiu a calibração do modelo de cálculo e, posteriormente, a exploração do mesmo no âmbito do sistema de alerta de cheias em obra.

Na realização desta dissertação foram estudados os eventos de precipitação/escoamentos ocorridos entre o ano hidrológico 2006/2007 até ao ano hidrológico 2016/2017. Sendo o objetivo definir um modelo de alerta de cheias capaz de prever caudais que levem ao galgamento do recinto de obra, interessa analisar eventos de precipitação capazes de gerar um caudal de escoamento superior ao caudal de dimensionamento ($400 \text{ m}^3/\text{s}$) da galeria de desvio provisório. Nesse contexto e através de uma análise e tratamento dos dados hidrométricos registados na EH de Fridão para os anos hidrológicos em estudo, são considerados relevantes os períodos identificados no quadro 4.1.

Quadro 4.1-Períodos relevantes para o estudo da dissertação compreendidos entre o ano hidrológico 2006/2007 e 2016/2017

2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2014/2015	2015/2016	2016/2017
10/02/2007 a 15/02/2007	sem registos relevantes (o máximo caudal afluente à EH foi na ordem de $200 \text{ m}^3/\text{s}$)	22/01/2009 a 30/01/2009	14/11/2009 a 17/11/2009	05/12/2010 a 10/12/2011	sem registos relevantes (o máximo caudal afluente à EH foi na ordem de $250 \text{ m}^3/\text{s}$)	24/12/2013 a 08/01/2014	15/10/2014 a 18/10/2014	03/01/2016 a 15/01/2016	03/02/2017 a 07/02/2017
		03/02/2009 a 11/02/2009	05/12/2009 a 08/12/2009	05/01/2011 a 12/01/2011		04/02/2014 a 16/02/2014	13/11/2014 a 17/11/2014	10/02/2016 a 16/02/2016	
			21/12/2009 a 05/01/2010	16/02/2011 a 21/02/2011				28/03/2016 a 30/03/2016	
			22/02/2010 a 03/03/2010					14/04/2016 a 20/04/2016	

Por uma questão de segurança foram considerados como relevantes os intervalos que incluem eventos de precipitação que geram caudais superiores a $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Cruzando os períodos identificados no quadro 4.1 com os dados disponíveis no SNIRH para as estações meteorológicas obtém-se o quadro 4.2.

Quadro 4.2-Quadro resumo dos períodos referentes aos anos hidrológicos utilizados para construir o modelo meteorológico do HEC-HMS.

Ano hidrológico	Dados hidrométricos significativos	Estações Meteorológicas	Períodos a analisar
2006/2007	10/02/2007 a 15/02/2007	Sem registos	-
2007/2008	sem registos significativos	-	-
2008/2009	22/01/2009 a 30/01/2009	Carvalho; Lamas de Alvadia; Salto; Moreira do Rei; Couto de Dornelas; S. Marta Montanha	22/01/2009 a 11/02/2009
	03/02/2009 a 11/02/2009		
2009/2010	21/12/2009 a 05/01/2010	Candemil; Santa Marta da Montanha; Salto; Gontim	21/12/2009 a 19/01/2010
	12/01/2010 a 19/01/2010		
	22/02/2010 a 03/03/2010	Sem registos	-
2010/2011	05/12/2010 a 10/12/2011	Inoperacional	-
	05/01/2011 a 12/01/2011		
	16/02/2011 a 21/02/2011		
2011/2012	sem registos significativos	Inoperacional	-
2012/2013	13/12/2012 a 15/12/2012	Inoperacional	-
	18/01/2013 a 21/01/2013		
	24/03/2013 a 13/04/2013		
2013/2014	24/12/2013 a 08/01/2014	Inoperacional	-
	04/02/2014 a 16/02/2014		
2014/2015	15/10/2014 a 18/10/2014	Sem registos	-
	13/11/2014 a 17/11/2014		
2015/2016	03/01/2016 a 15/01/2016	Cabeceiras de Basto; Cavez; Celorico de Basto; Lamas de Alvadia; Carvalho; Brancelhe; Gontim; Moreira do Rei; Salto; S. Marta Montanha; Vilar do Porro	03/01/2016 a 15/01/2016
	10/02/2016 a 16/02/2016	Cavez; Lamas de Alvadia; Paradaça; Loureiro; Candemil; Salto; Vilar do Porro	10/02/2016 a 16/02/2016
	28/03/2016 a 30/03/2016	Cavez; Celorico de Basto; Lamas de Alvadia; Vilar do Porro; Lixa do Alvão; Loureiro; Salto	28/03/2016 a 20/04/2016
	14/04/2016 a 20/04/2016		
2016/2017	03/02/2017 a 07/02/2017	Amarante; Cabeceiras de Basto; Lamas de Alvadia; Moreira do Rei; Gontim	03/02/2017 a 07/02/2017

Em alguns casos, devido à insuficiência de estações para caracterizar a bacia no que respeita à pluviosidade, foi necessário a utilização de estações na proximidade da bacia.

Como mencionado ao longo deste capítulo, a rede de monitorização não esteve a funcionar entre 2010 e 2014 pelo que esses anos hidrológicos não foram de objeto de análise. Recorrendo a uma análise do quadro 4.2, é possível observar que as estações utilizadas para caracterizar a bacia no ano hidrológico 2015/2016 variam para os diferentes intervalos de tempo estudados. Essa variação é uma consequência

da ausência de continuidade dos dados pluviométricos na maioria das estações, estando esse fator relacionado essencialmente com o entupimento dos pluviômetros, falta de manutenção ou atos de vandalismo.

5

CONSTRUÇÃO DO MODELO DE ALERTA DE CHEIAS PARA O APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO DE FRIDÃO

5.1. INTRODUÇÃO

Esta dissertação, como já referido, tem como objetivo a criação de um modelo de alerta de cheias em obra destinado, em particular, à sua implementação durante a construção do aproveitamento de Fridão.

Recorda-se que, de acordo com o Projeto do aproveitamento hidroelétrico (AH) de Fridão, a obra de desvio provisório terá capacidade para desviar um caudal de dimensionamento de $400 \text{ m}^3/\text{s}$, o que significa que, para um caudal afluente superior, esse canal de desvio provisório será insuficiente, correndo o risco de haver inundação do recinto da obra e, conseqüentemente, ocorrer perdas materiais, ambientais e até mesmo humanas. De modo a mitigar o efeito destes galgamentos, podem implementar-se sistemas de alerta de cheias em obra capazes de avisar atempadamente as entidades intervenientes com o intuito de garantirem a segurança das equipas e materiais afetos à obra.

Para a caracterização do sistema são habitualmente definidos dois níveis de alerta: i) o nível de vigilância ou alerta amarelo que imite um aviso inicial para as entidades intervenientes estarem de prevenção, havendo a possibilidade de atingir o caudal de dimensionamento; ii) e o nível de alerta laranja, que traduz numa forte possibilidade do galgamento do recinto da obra.

Como referido anteriormente, após entrada em funcionamento do Sistema Electroprodutor do Tâmega, o curso de água da bacia intermédia, entre os AH Daivões e Fridão, deixa de estar em regime natural, passando a estar regularizado pela entidade gestora desse conjunto de aproveitamentos hidroelétricos. Nesse contexto, deixa de ser possível implementar sistemas de alerta que relacionam caudais registados na estação situada a montante (desejavelmente a estação de aviso) com os da estação situada a jusante (estação que traduz as afluências ao local da obra) como foram os casos dos sistemas de alerta utilizados no Baixo Sabor (2011) e em Foz Tua (2014).

Ainda assim, a título académica/teórico, foi efetuada a experiência de correlacionar os dados da EH Ponte Cavez (estação de montante) com os da EH Fridão (estação de montante). Esse estudo encontra-se sumariamente descrito em 5.2.

No entanto, devido à construção dos AH a montante da EH Ponte de Cavez não é possível usar um modelo deste tipo, devido à modificação do regime do rio, daí a necessidade de, neste caso, utilizar um programa de simulação que tenha por base um modelo numérico de precipitação/escoamento capaz de simular o caudal gerado na bacia intermédia entre os AH Daivões e Fridão. Neste caso, foi utilizado o *software* HEC-HMS. De modo a obter os hidrogramas de cheia na secção pretendida é necessário introduzir no *software* em questão, as características do modelo da bacia, do modelo hidromorfológico e do modelo meteorológico. Esses modelos serão pormenorizados nos próximos subcapítulos.

A aplicação deste modelo ao caso de estudo segue o procedimento ilustrado no seguinte fluxograma.

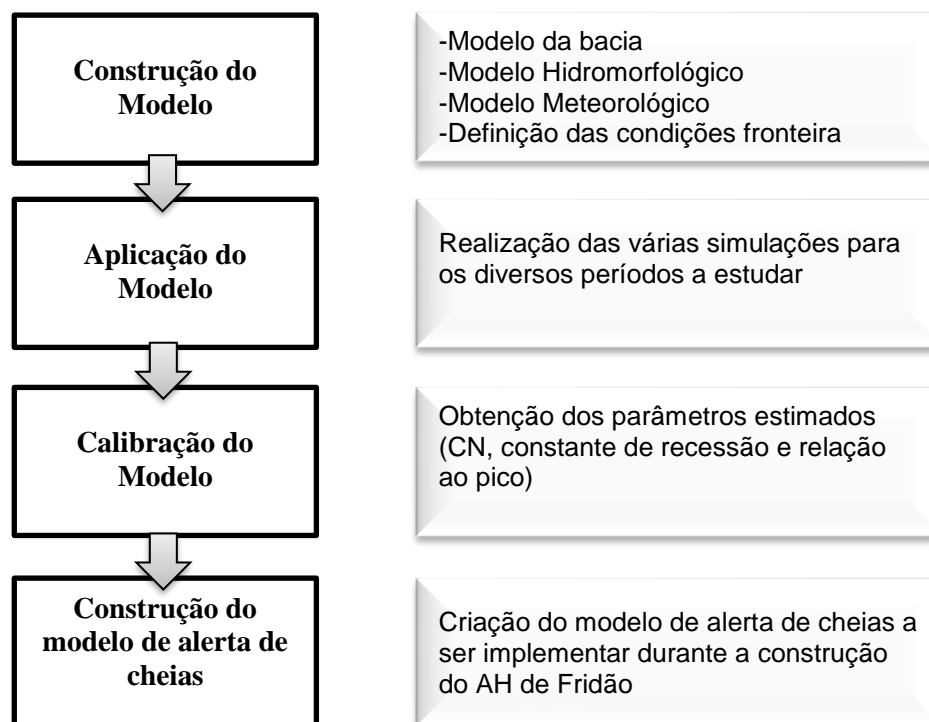


Figura 5.1-Metodologia a aplicar para obtenção do sistema de alerta de cheias em obra, recorrendo a um modelo numérico precipitação/escoamento.

5.2.CORRELAÇÃO ENTRE AS ESTAÇÕES HIDROMÉTRICAS

A definição de modelos de alerta cheias, como é o caso dos que foram implementados para o AHBS e AHFT, passa por efetuar uma análise das séries de dados hidrométricos registados pelas EH localizadas na bacia. Conforme já mencionado, este modelo só é aplicável em situações de regime natural, no entanto, foi realizada, numa fase inicial deste trabalho, a correlação entre duas das EH de modo a perceber a evolução dos caudais na bacia situada entre os AH de Daivões e de Fridão.

As estações utilizadas na obtenção dessa correlação foram as EH de Ponte Cavez (estação a montante) e EH de Fridão (estação de jusante) para os anos hidrológicos compreendidos entre 2006/07 e 2016/17

Antes de proceder a uma correlação direta entre as séries de dados das EH foi necessário efetuar uma análise dos hidrogramas registados em cada EH para os anos hidrológicos em estudo. Na análise dos hidrogramas foram registados, para ambas as EH, os pontos máximos (picos) e os pontos mínimos (cavas) de cada evento analisado, bem como a sua correspondência nos dois hidrogramas, tendo-se depois implantado esses valores de modo a obter a correlação pretendida.

Na Figura 5.2 apresenta-se a correlação em questão.

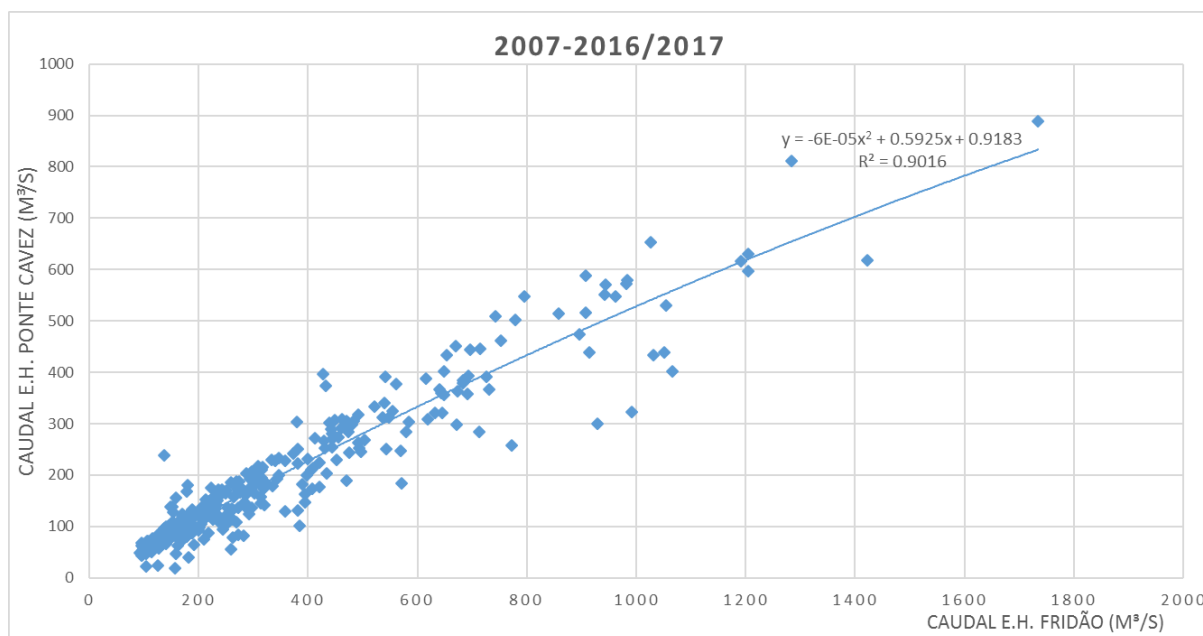


Figura 5.2- Correlação entre caudais registados nas EH de Fridão e Ponte Cavez

Pela análise da figura indicada, verificou-se existir uma dispersão bastante significativa dos dados, ou seja, não se verificava uma forte correlação entre os dados das EH de Ponte de Cavez e Fridão, ao invés do que acontecia com as estações existentes nas bacias do Sabor e do Tua. Esta situação está certamente relacionada com a preponderância do escoamento gerado na bacia intermédia entre as duas estações analisadas.

De modo a obviar a esta situação, considerou-se a possibilidade de utilizar a EH Ôlo para caracterizar, de alguma forma, o regime da bacia intermédia, ainda que esta se localize no rio Ôlo, cuja confluência com o rio Tâmega ocorre já a jusante do local do escalão principal do AH Fridão.

No entanto, não se avançou com este estudo, por um lado, porque se tratava de um exercício puramente académico que em termos práticos não tinha viabilidade (dada a previsível alteração de regime do rio Tâmega a montante do AH Fridão com a construção dos AH de Daivões, Gouvães e Alto Tâmega) e, por outro, devido à necessidade de conhecer os dados de caudais da EH Ôlo que, por ser uma EH recente, ainda não tem curva de vazão definida.

5.3. ELABORAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO NO HEC-HMS

5.3.1. CONSTRUÇÃO DO MODELO DE BACIA

O modelo de bacia corresponde à estruturação geral utilizada para descrever as propriedades físicas da bacia e a topologia da rede hidrográfica. Neste modelo ficam definidos os elementos hidrológicos a considerar, nomeadamente as sub-bacias e os troços fluviais (Mendes, 2017).

O modelo de bacia utilizado foi uma adaptação do já estabelecido nos Estudos Hidrológicos de águas superficiais realizados no âmbito do Projeto do AH de Fridão. Este modelo de bacia foi desenvolvido pela EDP Produção dividindo a bacia hidrográfica em 25 sub-bacias, sendo cada uma delas constituída por duas superfícies de escoamento, correspondentes às zonas em que é dividida pela linha de água principal que a atravessa. Na figura 5.3 é possível observar o conjunto de sub-bacias que constitui o modelo da bacia.



Figura 5.3-Modelo de bacia (EDP, 2011)

Na realização desses estudos hidrológicos foram caracterizadas as sub-bacias referentes à totalidade da bacia hidrográfica do rio Tâmega. Para o desenvolvimento desta dissertação, no entanto, apenas interessa estudar a bacia intermédia situada entre a estação hidrométrica de Ponte Cavez (imediatamente a jusante do AH Daivões) e o local do AH Fridão, resultando das seguintes sub-bacias: TAM20, TAM19, TAM18, TAM17, TAM16 e TAM15. De referir, que esta última sub-bacia não contribui na totalidade para a bacia intermédia visto que a EH de Ponte Cavez fica localizada no interior dessa sub-bacia. Os parâmetros (área que constituem essa bacia foram medidos utilizando ferramentas do AUTOCAD, passando a designar-se por TAM15 (B). A figura 5.4 ilustra o modelo da bacia intermédia definido no HEC-HMS.

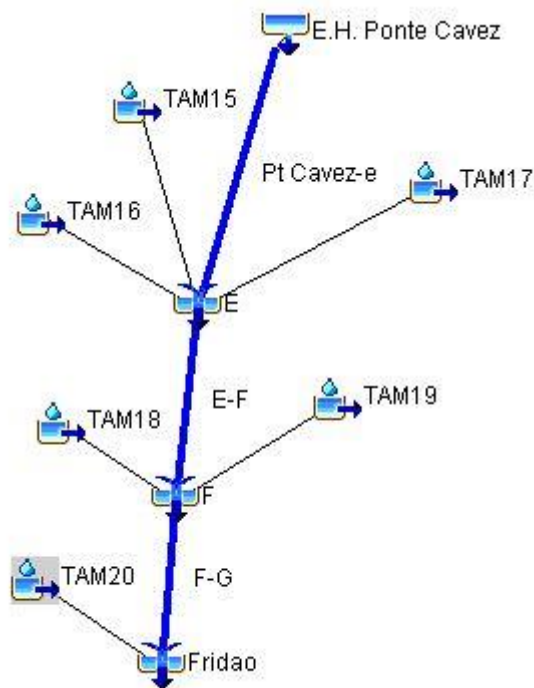


Figura 5.4-Modelo da bacia intermédia no HEC-HMS

5.3.2. ELABORAÇÃO DO MODELO HIDROMORFOLÓGICO

Para o modelo hidromorfológico, dos métodos descritos no capítulo 3, consideraram-se os seguintes:

- Método do Número de Escoamento do SCS – para calcular o volume total de escoamento gerado pela precipitação;
- Método da Onda Cinemática – com o objetivo de simular o escoamento direto, isto é, o escoamento subsuperficial e o escoamento à superfície do terreno;
- Método da Recessão – para obter o escoamento de base, ou seja, calcula o escoamento originado pelas massas de água subterrâneas;
- Método de Muskingum-Cunge – com o intuito de calcular o escoamento ao longo das linhas de água;

Cada um dos métodos de simulação é caracterizado por parâmetros específicos. Alguns desses parâmetros podem ser obtidos através da observação e/ou medição de características da bacia hidrográfica e das linhas de água. Os restantes podem ser estimados por um processo de calibração (ver em 5.3). No quadro 5.1, apresentam-se os parâmetros necessários para caracterizar cada um dos métodos de simulação selecionados, assim como os critérios adotados no estudo desenvolvido para a sua determinação.

Quadro 5.1-Quadro resumo dos métodos utilizados para simular os processos hidrológicos, parâmetros requeridos e critérios de estimação adotados

Componente hidrológica	Método de simulação selecionados	Parâmetros de simulação	Critério/ processo para estimação dos parâmetros
Precipitação útil (modelo das perdas de precipitação)	Método do número de escoamento do SCS	Retenção inicial (mm)	Considerado nulo
		Número do Escoamento do SCS	Processo de calibração
		Área impermeável (%)	Considerado nulo
Escoamento direto	Modelo da onda Cinemática	Área da sub-bacia	Baseado nas características das sub-bacias. (os mesmos que os utilizados no Estudo Hidrológico do AH efetudao pela EDP Produção)
		Largura da superfície de escoamento	
		Declive médio da sub-bacia	
		Rugosidade	
		Comprimento da linha de água	
		Declive médio da linha de água	
		Secção (trapezoidal)	
Escoamento de base	Método de Recessão	Coef. Manning	
		Caudal inicial ($\text{m}^3\text{s}^{-1}/\text{km}^2$)	Registos de caudais
		Constante de recessão	Processo de calibração
Propagação em canal (Escoamento fluvial)	Método de Muskingum-Cunge	Relação ao pico	Análise de sensibilidade
		Comprimento da linha de água	Baseado nas características das linhas de água (os mesmos que os utilizados no Estudo Hidrológico do AH efetudao pela EDP Produção)
		Inclinação do talvegue	
		Forma da secção do escoamento (largura do canal e inclinação das margens)	
		Coeficiente de Manning	Os mesmos que os utilizados no Estudo Hidrológico do AH efetudao pela EDP Produção

5.3.2.1. Modelo de Perdas de Precipitação

No modelo de perdas e precipitação, tal como foi anteriormente referido, os parâmetros a definir são a retenção inicial, a área impermeável e o número de escoamento do SCS, sendo este último o que tem maior influência nos resultados das simulações.

Relativamente à retenção inicial e à área impermeável, a primeira varia de evento para evento, enquanto que o valor da percentagem de área impermeável mantém-se residual, sendo parâmetros considerados de difícil caracterização.

De forma a testar a sensibilidade do modelo, foram efetuadas simulações, numa fase inicial, em que se constatou que, para eventos de intensa precipitação, a variação dos parâmetros tem impacto pouco

significativo, principalmente no que diz respeito à percentagem da área impermeável. Nesse sentido, estes parâmetros foram considerados nulos em todas as sub-bacias.

No que diz respeito ao parâmetro (CN) este pode variar consoante as condições hidrológicas anteriores, refletindo o estado atual da humidade do solo.

A calibração deste parâmetro, efetuada para cada evento de cheia (descrita seguidamente em 5.3), ajustado à variação das características hidrometeorológicas na bacia, permitiu, de certo modo minimizar os efeitos nos resultados das simulações causados pela fixação dos parâmetros de simulação correspondentes à retenção inicial e à área impermeável.

De acordo com o exposto no anexo B, o CN deve variar entre 30 para valores mínimos e 100 para valores máximos. No entanto, analisando as características gerais das bacias portuguesas, chegou-se à conclusão que o parâmetro CN deve variar entre 30 e 80.

A figura 5.5 ilustra os números de escoamento médios para as bacias situadas no Norte de Portugal Continental.

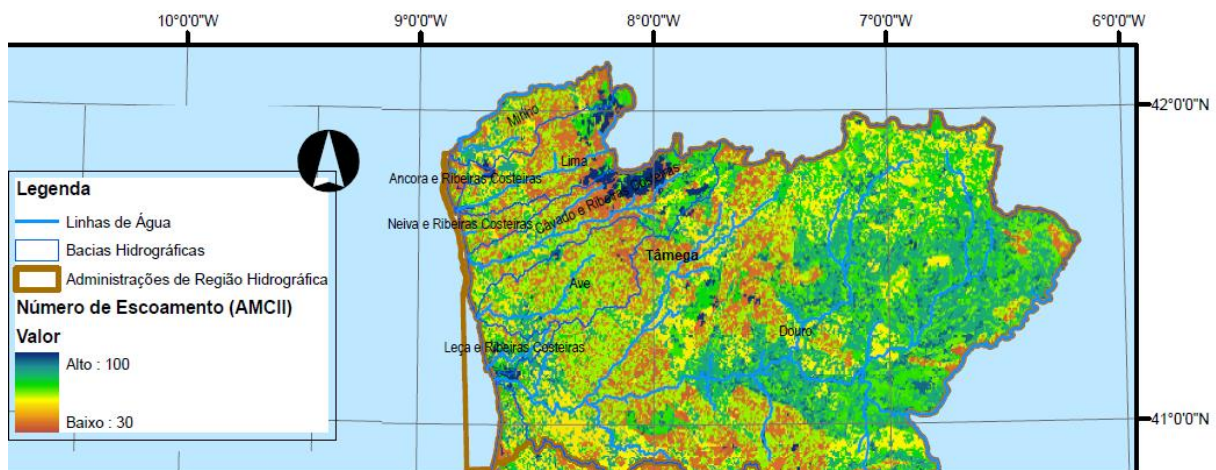


Figura 5.5- Números de Escoamento (AMC II) (SNIRH, 2018)

No processo de calibração deste parâmetro foi-se variando este parâmetro em incrementos/decrementos sucessivos de 5 unidades, de modo a aproximar o hidrograma de cheias de cálculo ao hidrograma de cheias real observado na EH Fridão e, portanto, no local da obra.

5.3.2.2. Modelo de Escoamento Direto

Nos quadros seguintes são apresentadas as características fisiográficas consideradas no modelo de simulação hidrológica em relação às superfícies de escoamento (quadro 5.2) e às linhas de água (quadro 5.3). Cada sub-bacia foi dividida em duas tendo em conta o troço fluvial principal, formando assim duas superfícies de escoamento.

Quadro 5.2-Valores dos parâmetros de simulação em cada sub-bacia relativos às superfícies de escoamento (EDP, 2011)

Superfícies de Escoamento

Sub-bacias	Área		Largura (m)	Declive	Fator Rugosidade (m-1/3s)
	(Km2)	(%)			
TAM15	58.6	82	5351	0.15	0.5
	12.9	18	1178	0.30	0.5
TAM16	104.5	57	4338	0.15	0.5
	78.1	43	3242	0.15	0.5
TAM17	116.3	71	3525	0.15	0.5
	47.4	29	1437	0.15	0.5
TAM18	57.4	66	4314	0.15	0.5
	30.1	34	2262	0.30	0.5
TAM19	28.5	46	1725	0.20	0.5
	33.9	54	2052	0.20	0.5
TAM20	62.7	73	3545	0.15	0.5
	41.8	27	1334	0.25	0.5

Quadro 5.3-Valores dos parâmetros de simulação em cada sub-bacia relativos aos troços fluviais (EDP, 2011)

Linhas de Água					
Sub-bacias	Comp. (m)	Declive	Secção (trapezoidal)		Coef Manning (m ^{-1/3} s)
			Base (m)	Declive Lados	
TAM15	10952	0.0037	20	1/2.5	0.07
TAM16	24085	0.0378	8	1/2.5	0.15
TAM17	32995	0.0242	8	1/2.5	0.15
TAM18	13304	0.0026	20	1/2.5	0.07
TAM19	16524	0.0657	8	1/2.5	0.15
TAM20	17689	0.0025	20	1/2.5	0.07

5.3.2.3. Modelo de Escoamento de Base

O método selecionado para calcular o escoamento de base foi o de recessão exponencial, exposto em 3.4.4.1, e os parâmetros que caracterizam esse método são o caudal inicial, a constante de recessão e a relação ao pico.

Caudal inicial

Na aplicação deste modelo, o HEC-HMS requer a definição do caudal inicial para cada sub-bacia, estabelecendo como um parâmetro de condição inicial. Na ausência de registos contínuos de caudais nas secções consideradas como secções de referência, uma solução passa por utilizar o caudal específico naquela secção, tendo conhecimento do caudal numa secção conhecida (neste caso, a jusante, na secção da EH de Fridão). Esse caudal corresponde ao quociente entre o caudal registado, no dia anterior à simulação, numa estação hidrométrica e a área de drenagem correspondente, sendo essa área a soma total das áreas das sub-bacias localizadas a montante.

Tendo em conta que se dispõe de registos hidrométricos em duas secções de referência correspondentes às EH de Ponte Cavez e de Fridão, a atribuição do caudal inicial em cada sub-bacia vai ser igual ao quociente entre o caudal da bacia intermédia – caudal registado na EH de Fridão subtraído do caudal registado na EH de Ponte Cavez - e a área da bacia intermédia que drena até à secção da EH de Fridão. Pelo facto de a EH de Ponte Cavez corresponder a uma secção de entrada intermédia do modelo e, como tal, não se pode considerar a área que drena para essa secção.

Relação ao pico/Rácio

Antes de dar início à simulação, para além de ser necessário definir o caudal inicial, é também imposto como condição inicial o parâmetro designado por relação ao pico (descrito em 3.4.4.1). De acordo com estudos realizados (Mendes, 2017) e face às simulações iniciais realizadas optou-se por arbitrar inicialmente o valor da relação ao pico em 0,3 para todas as sub-bacias. Este valor é inicialmente arbitrado e posteriormente calibrado face a uma análise do hidrograma obtido em comparação com o hidrograma desejado. Nas simulações realizadas numa fase inicial, de teste ao modelo, observou-se que variações dos valores deste parâmetro provocam alterações significativas no modelo principalmente no ramo descendente do hidrograma de cheia.

Constante de recessão

Tendo em conta o manual do programa HEC-HMS (Feldman, 2000) que sugere a utilização de valores compreendidos entre 0,7 e 0,9, foi estipulado inicialmente o valor mínimo (0,7) para cada simulação e posteriormente reajustado, caso fosse necessário, no processo de calibração.

5.3.2.4. Modelo de Propagação do Escoamento em Canal

Para a modelação da propagação do escoamento foi considerado o método de Muskingum-Cung (descrito no anexo B). Os parâmetros utilizados (identificados no quadro 5.1) para caracterizar este método encontram-se discriminados no quadro 5.3.

5.3.3. ELABORAÇÃO DO MODELO METEOROLÓGICO

O modelo meteorológico consiste na definição das variáveis meteorológicas. É neste modelo que ficam definidas os dados de entrada relativos à precipitação, evapotranspiração e degelo, assim como os métodos de introdução de cada uma dessas variáveis.

Como mencionado anteriormente, as perdas resultantes dos processos de evaporação e evapotranspiração consideram-se desprezáveis na simulação de eventos de intensa pluviosidade. Relativamente ao degelo, apesar de ser considerada uma variável que pode ter uma contribuição significativa para a ocorrência de cheias em algumas regiões, não foi considerado no modelo porque estudos realizados chegaram à conclusão que em Portugal esse efeito é diminuto, além de que seria difícil simular a sua contribuição apenas com os dados disponíveis. Tendo em conta essas considerações, o modelo fica definido apenas com a introdução da precipitação em cada sub-bacia.

Para o presente estudo, foram consultados os dados de precipitação disponíveis no SNIRH, quer para a bacia do Tâmega na bacia intermédia em estudo, quer nas proximidades da mesma. Foi efetuada uma análise preliminar à qualidade dos dados em questão, tendo-se excluído aqueles que não se consideraram válidos (por exemplo, por aparente entupimento do pluviómetro), devido a claros problemas de funcionamento da estação meteorológica.

Em seguida são apresentadas ilustrações da aplicação do método de Thiessen para os períodos com maior relevância para a simulação hidrológica, identificados em 4.4.2.

No quadro seguinte indicam-se as estações pluviométricas disponíveis para cada evento de cheia estudado.

Quadro 5.4- Estações meteorológicas utilizadas para caracterizar a bacia, para cada simulação efetuada

Situações	Ano hidrológico	Intervalo de estudo	Estações
Situação 1	2008/2009	11/01/2009- 02/02/2009	Carvalho; Lamas de Alvalia e Salto
Situação 2	2009/2010	01/12/2009- 19/01/2010	Candemil; S. Marta Montanha e Salto; Gontim
Situação 3	2015/2016	24/12/2015- 15/01/2016	Cabeceiras de Basto; Cavez; Celorico de Basto e Lamas de Alvalia
Situação 4	2015/2016	01/02/2016- 16/02/2016	Cavez; Lamas de Alvalia e Paradança
Situação 5	2015/2016	18/03/2016- 18/04/2016	Cavez; Celorico de Basto e Lamas de Alvalia
Situação 6	2016/2017	23/01/2017- 06/02/2017	Amarante; Cabeceiras de Basto e Lamas de Alvalia

Em seguida são apresentadas ilustrações da aplicação do método de Thiessen para os períodos com maior relevância para a simulação hidrológica, identificados no quadro anterior (Figuras 5.6 a 5.11).

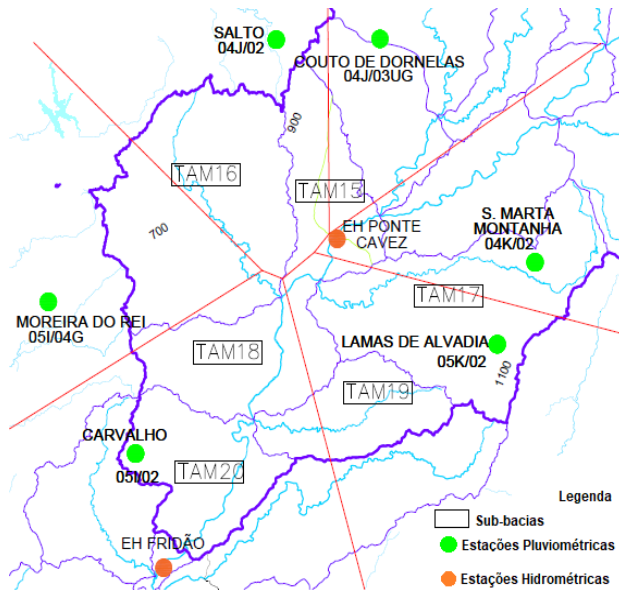


Figura 5.6- Aplicação do método de Thiessen para o período referente ao ano hidrológico 2008/2009

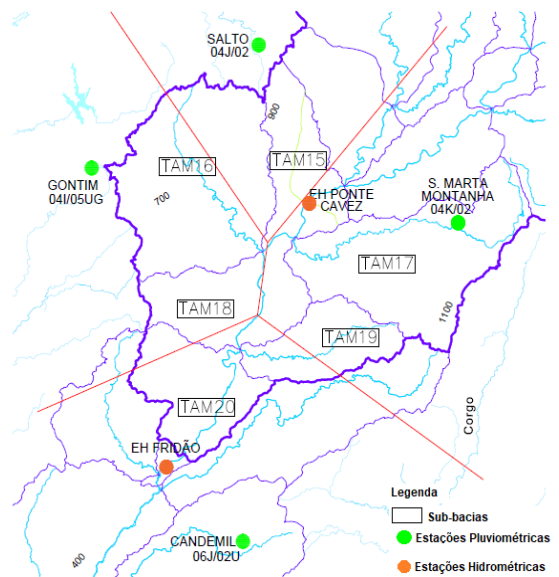


Figura 5.7- Aplicação do método de Thiessen para o período referente ao ano hidrológico 2009/2010

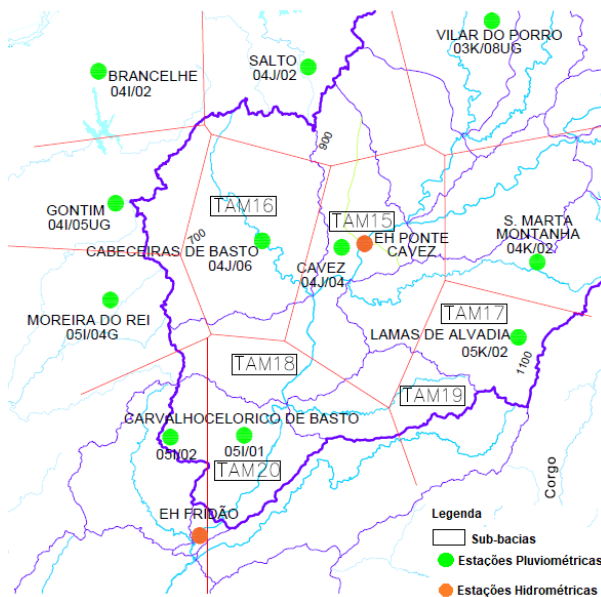


Figura 5.8- Aplicação do método de Thiessen para o primeiro período referente ao ano hidrológico 20015/2016

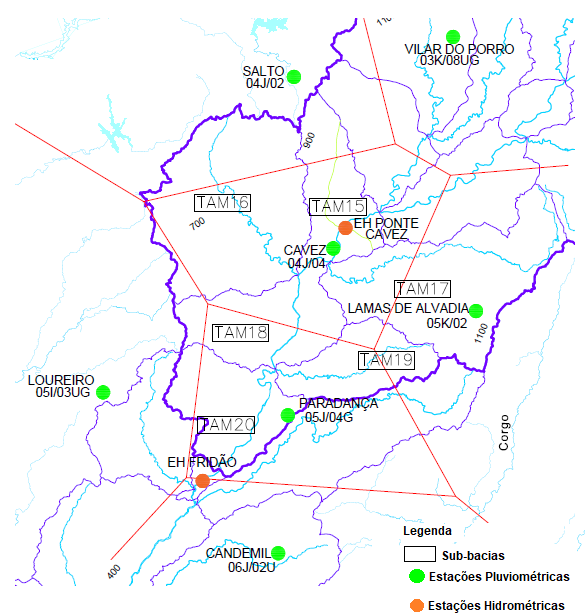


Figura 5.9- Aplicação do método de Thiessen para o segundo período referente ao ano hidrológico 20015/2016

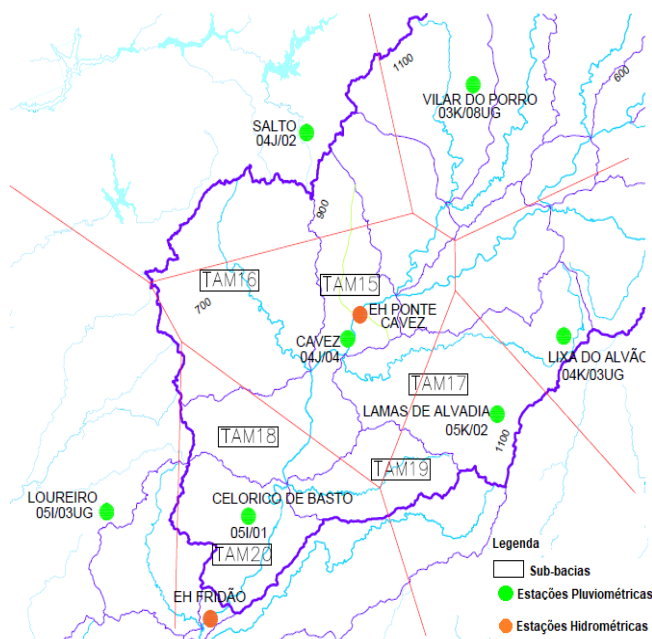


Figura 5.10- Aplicação do método de Thiessen para o terceiro período referente ao ano hidrológico 20015/2016

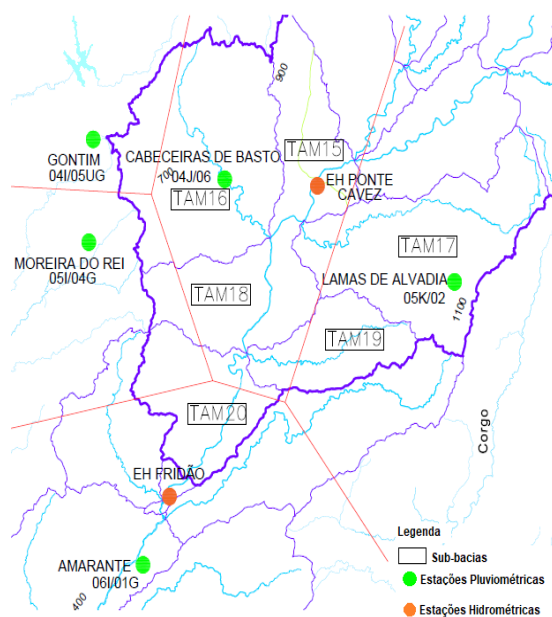


Figura 5.11- Aplicação do método de Thiessen para o período referente ao ano hidrológico 2016/2017

5.3.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No HEC-HMS é estabelecido o intervalo temporal no qual decorre a simulação, através da definição de uma data e hora de início, e uma data e hora de término.

Ao efetuar as simulações, detetou-se que o tempo decorrido entre o início da simulação e o início da cheia era preponderante para a obtenção de resultados adequados, tendo-se, por isso, efetuado uma análise de sensibilidade, da qual se apresenta um exemplo relativamente à cheia de janeiro de 2016. Nas Figuras 5.12 e 5.13 é efetuada uma comparação entre o hidrograma calculado pelo HEC-HMS e o hidrograma real registado pela EH Fridão, para diferentes datas/horas de início da simulação.

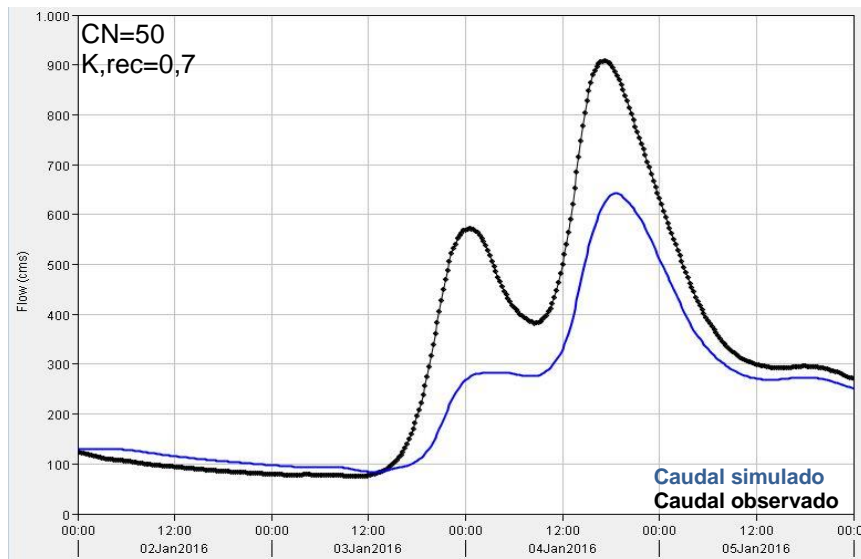


Figura 5.6-Hidrograma de cheia simulado para um evento de precipitação ocorrido entre 03/01/2016 e 05/01/2016



Figura 5.7-Hidrograma de cheia simulado para eventos de precipitação ocorridos entre 24/12/2015 e 05/01/2016

Como se pode observar na Fig. 5.12, ao iniciar a simulação no dia 01/01/2016 o pico do hidrograma corresponde a um valor de cerca de 650 m³/s. No entanto, se se iniciar a simulação com mais dias de antecedência (24.12.2015), o pico do hidrograma é mais elevado comparativamente com a primeira simulação, obtendo-se cerca de 740 m³/s. Neste segundo caso, o hidrograma de cheia calculado pelo HEC-HMS aproxima-se mais do hidrograma de cheia observado na EH Fridão. Essa diferença deve-se essencialmente ao volume de perdas iniciais considerado pelo HEC-HMS (até ao solo ficar saturado). De facto, na primeira simulação, não são contabilizadas as precipitações anteriores ao dia 1 de janeiro (que já tiveram alguma contribuição para a saturação do solo).

Tendo presente as afirmações anteriores e de modo a obviar a esta questão, foi estabelecido que, neste estudo, cada simulação se iniciaria 10 dias antes da ocorrência do evento de precipitação que origina o hidrograma de cheias que se pretende estudar, em cada momento, quer no caso das simulações de calibração (subcapítulo 5.4), quer no das simulações do funcionamento do sistema de alerta (subcapítulo 5.5).

5.4.CALIBRAÇÃO DO MODELO

O processo de calibração de um modelo hidrológico consiste em estimar os valores dos parâmetros do modelo de modo a aproximar os resultados modelados da realidade. Geralmente, este processo é efetuado comparando os resultados obtidos das previsões do modelo (*outputs*) com os valores dos caudais observados nas secções de referência definidas no modelo, sob um mesmo aglomerado de conceitos por exemplo, condições meteorológicas, humidade do solo, período temporal (Neto, Ribeiro-Neto, & Montenegro, 2014; WMO, 2011)

Como já referido ao longo deste capítulo, antes de se proceder à simulação hidrológica para os diferentes eventos, foram realizados testes preliminares de modo a testar o funcionamento do modelo hidrológico. Esses testes consistiram na realização de várias simulações utilizando diferentes valores para os parâmetros considerados de simulação. Consideram-se parâmetros de simulação os parâmetros que não podem ser obtidos através das características físicas da bacia e cujas variações tem um impacto significativo sobre os resultados obtidos. Na realização das simulações foram considerados parâmetros de simulação a constante de recessão e a relação ao pico, para o cálculo do escoamento de base, e, o número de escoamento, para o cálculo do volume de escoamento gerado pela precipitação efetiva.

A calibração desses parâmetros foi realizada através de uma análise gráfica, que consiste na comparação dos hidrogramas obtidos pela simulação com os correspondentes hidrogramas observados. Este processo é frequentemente utilizado para avaliar o desempenho de uma simulação, permitindo, de uma forma prática e qualitativa, avaliar o grau de semelhança entre os resultados gerados pela simulação e as correspondentes observações (WMO, 2011).

Uma vez que apenas se dispõe apenas de duas estações hidrométricas na bacia com registos de caudais horários, o modelo hidrológico só pode ser calibrado numa secção de referência visto que uma das EH tem como finalidade o fornecimento de caudais afluentes à bacia. Nesse sentido, apenas a EH situada em Ponte Cavez servirá para proceder ao processo de calibração.

De salientar que, para a bacia hidrográfica em questão:

- Na presença de um período seco nos meses antecedentes à simulação, não se considera aceitável que o CN seja superior a 50.
- Se no período anterior à simulação se verificarem vários eventos de precipitação intensa, considera-se aceitável que o CN possa atingir valores de 70.

Com o processo de calibração, pretende-se obter, para cada período descrito no quadro 5.4, os valores dos parâmetros de calibração (CN, constante de recessão e o rácio/relação ao pico). Para cada um desses períodos referidos foram analisados os eventos que geraram um caudal afluente à EH Fridão que igualem ou superam o caudal de dimensionamento da obra de derivação provisória do AH Fridão (ver 4.3.1), estipulado em 400 m³/s.

Tendo em conta a localização e as características fisiográficas da bacia, e as simulações iniciais foram definidos os seguintes valores para os parâmetros de calibração: CN=50; Krec (constante de recessão)=0.7; Rácio/relação ao pico=0.3.

Nos próximos subcapítulos são apresentadas as situações referentes aos eventos de cheia identificados no quadro 5.4 e as respetivas calibrações. As figuras apresentadas ilustram os hidrogramas de cheia simulados antes da calibração (imagens do lado esquerdo) e após a calibração (imagens do lado direito), identificando os valores dos parâmetros obtidos pela calibração. Os eventos de cheia que se pretendem calibrar em cada simulação estão devidamente identificados (uma oval vermelha).

5.4.1. SITUAÇÃO 1: 11-01-2009 A 11-02-2009

Relativamente à situação 1 (quadro 5.4), os hidrogramas obtidos na aplicação do modelo para o período associado foram os da figura 5.14.

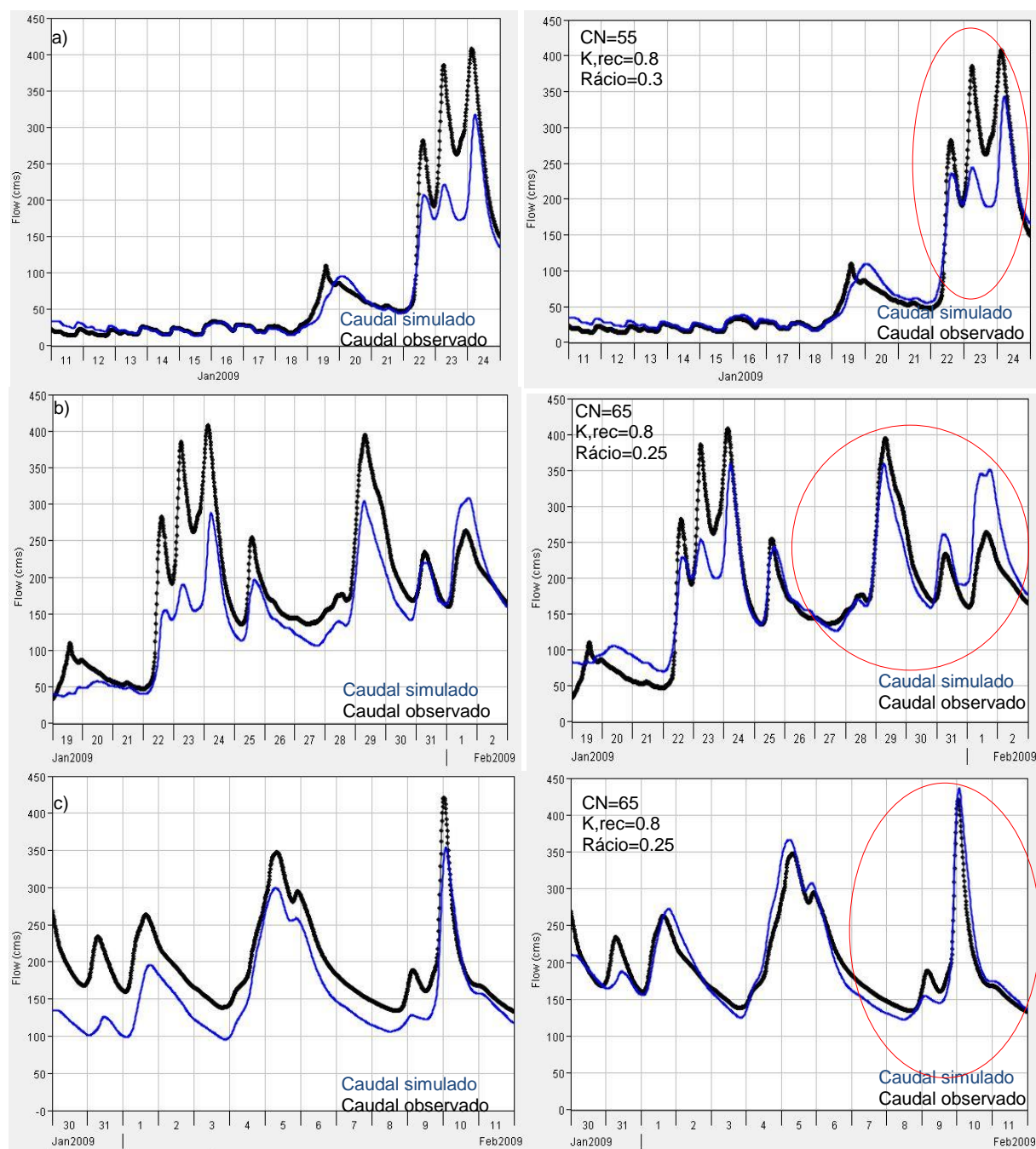


Figura 5.8- Comparação entre as simulações obtidas iniciais e as simulações após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente aos períodos: a) 11/01/2009 a 24/01/2009; b) 19/01/2009 a 02/02/2009; c) 30/01/2009 a 11/02/2009

À exceção do primeiro evento de cheia, verifica-se uma boa relação entre os hidrogramas simulados, resultantes do processo de simulação, e os hidrogramas observados pela EH de Fridão.

5.4.2.SITUAÇÃO 2: 01-12-2009 A 19-01-2010

Relativamente à situação 2 (quadro 5.4), os hidrogramas obtidos na aplicação do modelo para o período associado foram os da figura 5.15.

De salientar que devido à ausência de dados disponíveis nas estações pluviométricas da rede de monitorização, não foi possível efetuar a simulação com 10 dias de antecedência para o primeiro evento de precipitação compreendido entre 01/12/2009 e 09/12/2009.

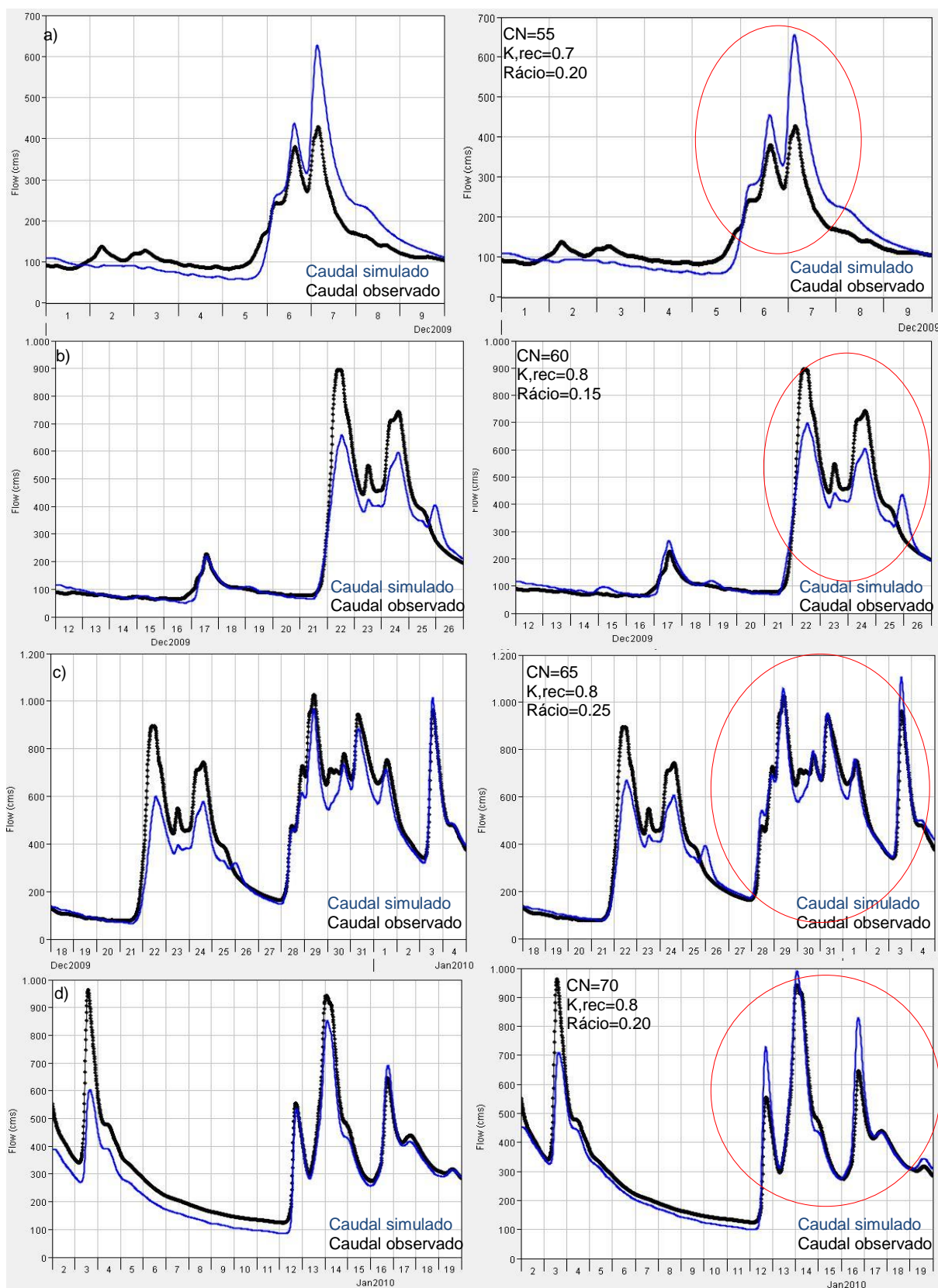


Figura 5.9- Comparação entre as simulações obtidas iniciais e as simulações após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente aos períodos: a) 01/12/2009 a 09/12/2009; b) 12/12/2009 a 26/12/2009; c) 18/12/2009 a 04/01/2010; d) 02/01/2010 a 19/01/2010

5.4.3.SITUAÇÃO 3: 24-12-2015 A 15-01-2016

Relativamente à situação 3 (quadro 5.4), os hidrogramas obtidos na aplicação do modelo para o período associado foram os da figura 5.16.

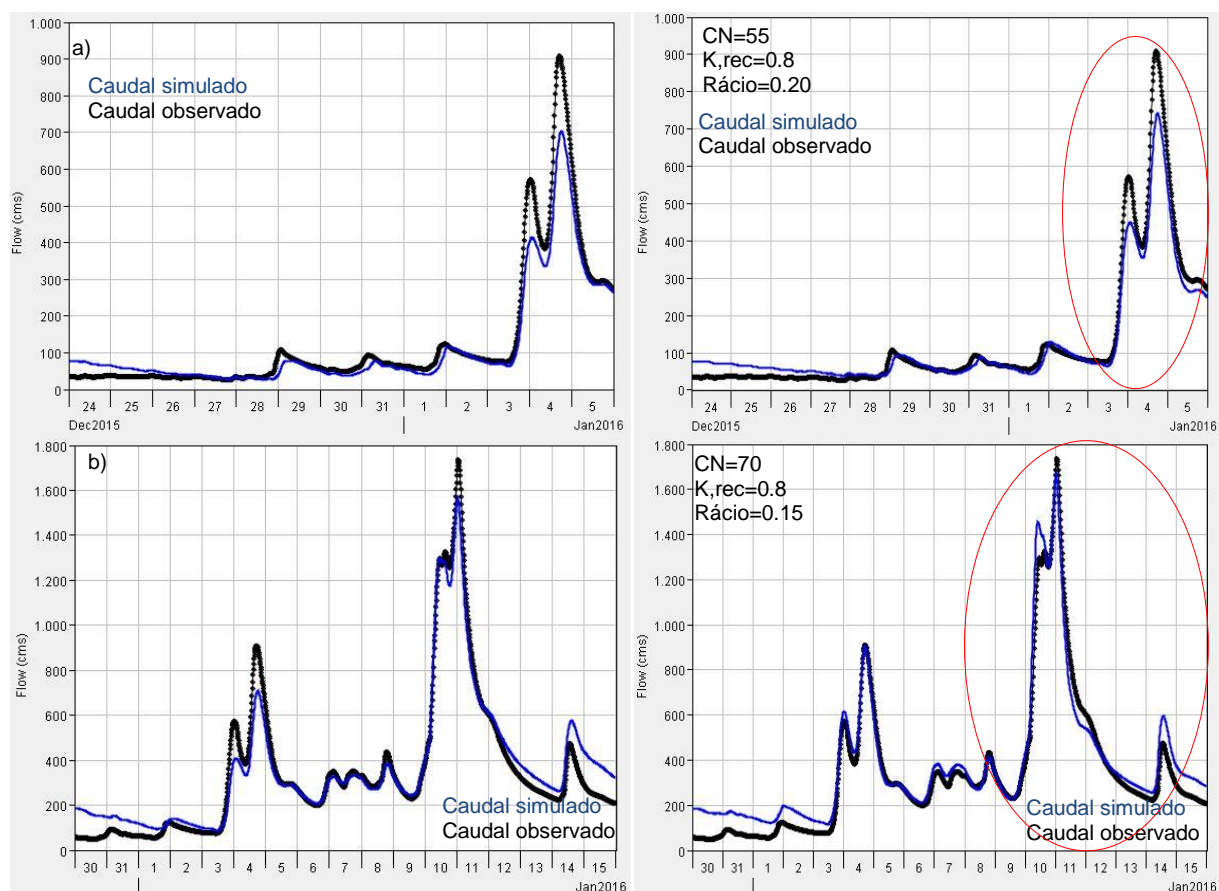


Figura 5.10- Comparação entre as simulações obtidas iniciais e as simulações após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente aos períodos: a)24/12/215 a 05/01/2016; b)30/12/2015 a 16/01/2016;

Os resultados simulados após o processo de calibração são praticamente idênticos aos observados pela EH de Fridão.

5.4.4.SITUAÇÃO 4: 16-01-2016 A 19-02-2016

Relativamente à situação 4 (quadro 5.4), os hidrogramas obtidos na aplicação do modelo para o período associado foram os da figura 5.17.

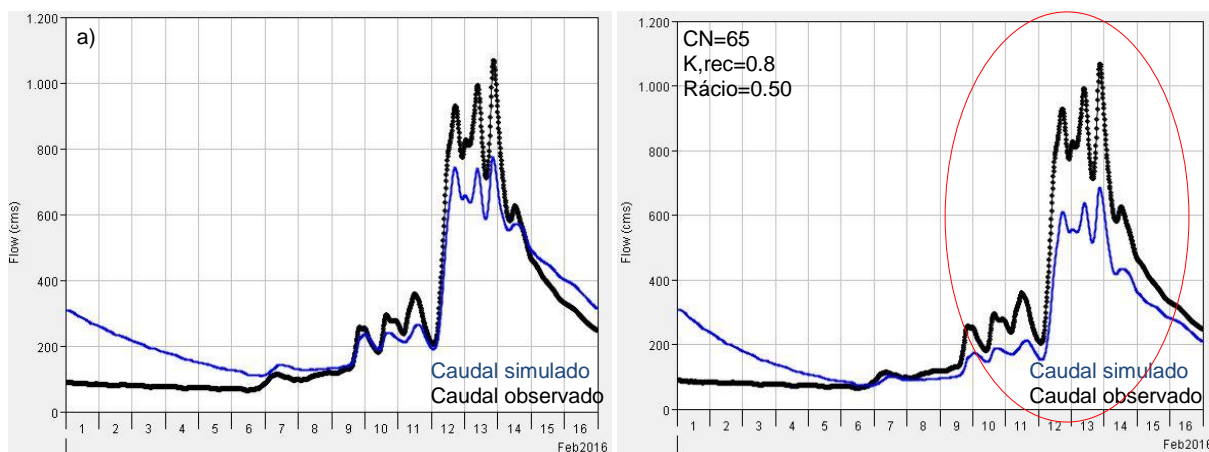


Figura 5.11- Comparação entre a simulação obtida inicial e a simulação após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente ao período 01/02/2016 a 16/02/2016

Recorrendo à análise da figura 5.17 observou-se um grande défice significativo de volume do hidrograma obtido pela simulação em relação ao observado na secção da EH de Fridão. Esse défice pode estar relacionado com i) o facto de uma ou mais das estações pluviométricas disponíveis não terem contabilizado toda a precipitação durante o evento (problema da medição) e tal não ter sido detetado no processo de análise à qualidade dos dados das mesmas; ii) as estações seleccionadas neste evento não caracterizarem devidamente (por defeito) a precipitação em uma ou mais sub-bacias; iii) contribuição significativa dos afluentes (rio Cabril e rio Ouro) ao troço principal. Esta última é considerada a menos provável de acontecer, tendo em consideração as áreas das bacias desses afluentes serem reduzidas comparado com a bacia do troço principal.

5.4.5. SITUAÇÃO 5: 18-03-2016 A 18-04-2016

Relativamente à situação 4 (quadro 5.4), os hidrogramas obtidos na aplicação do modelo para o período associado foram os da figura 5.18.

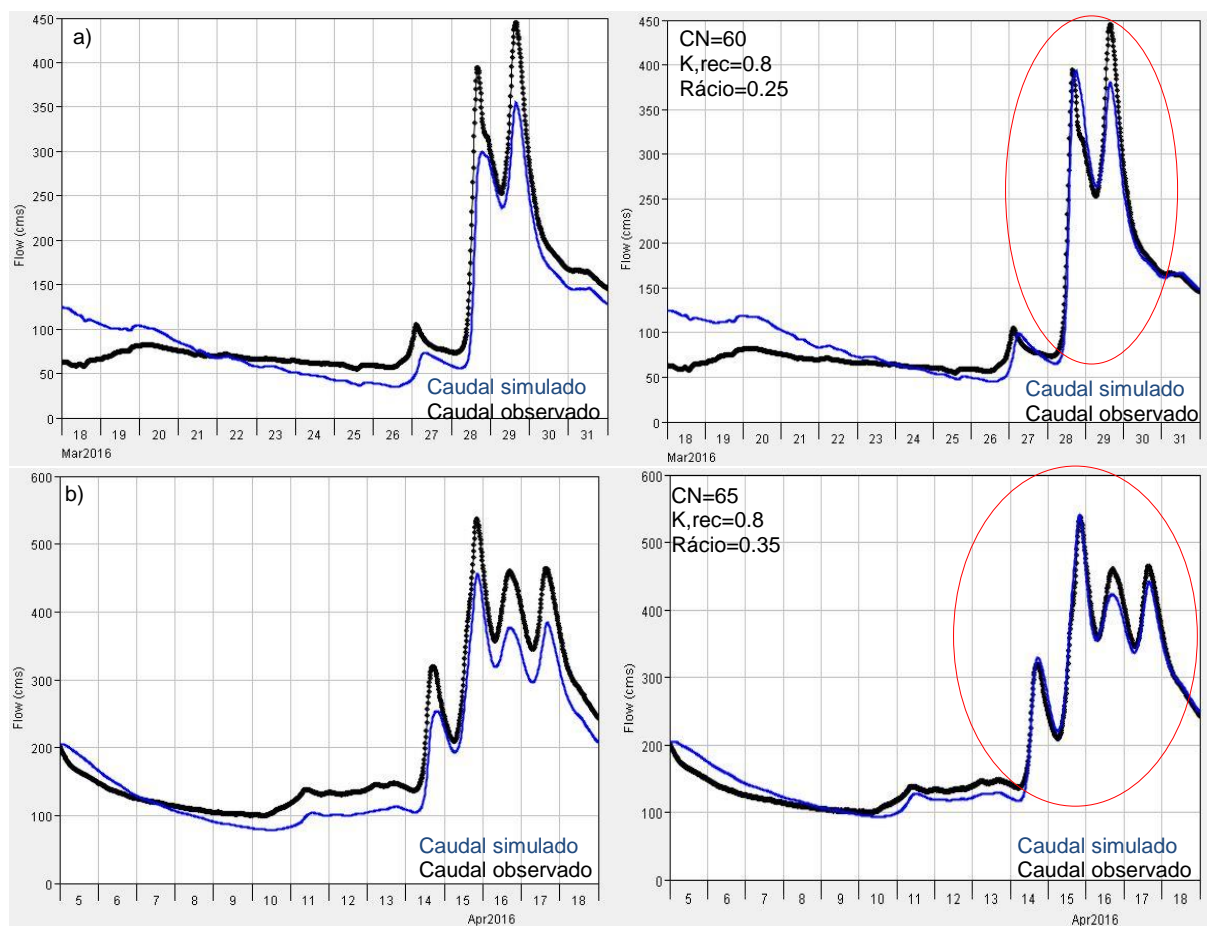


Figura 5.12-Comparação entre as simulações obtidas iniciais e as simulações após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente aos períodos: a) 18/03/2016 a 31/03/2016; b) 05/04/2016 a 18/04/2016.

Esta situação, em que consta 2 eventos de cheia, constitui uma boa relação de proximidade entre o caudal simulado e o observado.

5.4.6.SITUAÇÃO 6: 23-01-2017 A 06-02-2017

Relativamente à situação 4 (quadro 5.4), os hidrogramas obtidos na aplicação do modelo para o período associado foram os da figura 5.19.

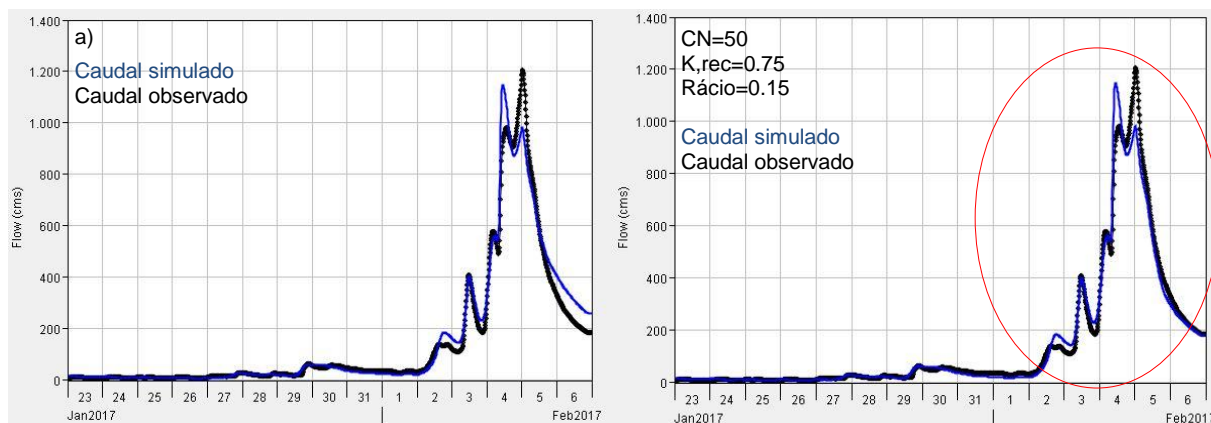


Figura 5.13- Comparação entre a simulação obtida inicial e a simulação após a calibração dos parâmetros, para a secção de Fridão, correspondente ao período 23/01/2017 a 06/02/2017

5.4.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao efetuar a calibração para as diferentes situações conclui-se que se obtiveram, de forma geral, bons resultados, ou seja, uma boa aderência dos hidrogramas calculados pelo HEC-HMS aos registados pela EH Fridão.

Os parâmetros obtidos podem ser consultados, sumariamente, no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Quadro síntese dos valores obtidos pelo processo de calibração

Situação	Período	CN	K rec	Rácio
1 (a)	11-01-2009 a 24-01-2009	55	0.80	0.30
1 (b)	19-01-2009 a 02-02-2009	65	0.80	0.25
1 (c)	30-01-2009 a 11-02-2009	65	0.80	0.25
2 (a)	01-12-2009 a 09-12-2009	55	0.70	0.20
2 (b)	12-12-2009 a 25-12-2009	60	0.80	0.15
2 (c)	19-12-2009 a 04-01-2010	65	0.80	0.25
2 (d)	02-01-2010 a 19-01-2010	70	0.80	0.20
3 (a)	24-12-2015 a 05-01-2016	55	0.80	0.30
3 (b)	30-12-2015 a 16-01-2016	70	0.80	0.15
4	01-02-2016 a 16-02-2016	65	0.80	0.50
5 (a)	18-03-2016 a 31-03-2016	60	0.80	0.25
5 (b)	05-04-2016 a 18-04-2016	65	0.80	0.35
6	23-01-2017 a 06-02-2017	50	0.75	0.10

Estando os parâmetros anteriores estimados ficam reunidas as condições para a definição do modelo de alerta de cheia em obra, última fase do procedimento descrito no início deste capítulo (figura 5.1).

De salientar, no entanto, que o número de simulações poderia ter sido superior, caso tivesse sido possível simular as situações de cheia ocorridas nos anos hidrológicos 2010/11 a 2014/15. De facto, a inexistência de dados de precipitação para este período foi determinante para a sua exclusão do presente estudo.

Analisando as situações apresentadas, para o ano hidrológico 2008/2009 e 2009/2010, altura em que o Instituto da Água (INAG) detinha a rede de monitorização, verifica-se a existência de poucas estações na área de bacia em estudo comparativamente com os últimos anos, altura em que a o INAG integrou APA e esta iniciou a reabilitação da rede de monitorização. Através da realização de um investimento foi possível reativar e melhorar a rede, sendo visível que para os anos hidrológicos 2015/2016 e 2016/2017 o número de estações é significativamente mais elevado (ver quadro 4.1), o que permite caracterizar de melhor forma a bacia e, consequentemente, obter valores simulados mais próximos dos valores observados, salvo a exceção de um período referente ao ano hidrológico 2015/2016.

Em síntese, a aquisição da rede de monitorização do SNIRH por parte da APA trouxe melhorias, não só quantitativas como também qualitativas, permitindo obter simulações mais próximas da realidade.

5.5.DEFINIÇÃO DO MODELO DE ALERTA DE CHEIAS EM OBRA

Conhecendo os caudais estimados na secção da EH Fridão (logo, no local da obra) e tendo previamente sido definidos níveis/caudais de alerta, é possível alertar as entidades responsáveis para eventuais galgamentos das ensecadeiras e consequente inundação do recinto da obra.

O modelo de alerta de cheias em obra para o AH de Fridão proposto neste capítulo utiliza o *software* HEC-HMS para simular o comportamento da bacia intermédia entre as EH Ponte de Cavez e Fridão (esta última praticamente coincidente com o local da obra) e, deste modo, estimar os valores dos caudais afluentes a esta última secção.

Recorde-se que, no modelo estabelecido, os dados de entrada são, para além de todos os parâmetros anteriormente estabelecidos em 5.3, as precipitações registadas nas diferentes estações meteorológicas disponíveis na bacia, bem como os dados dos caudais da EH Ponte de Cavez. De salientar, no entanto, que, no momento em que se realiza cada simulação, apenas se tem conhecimento destes dados hidrometeorológicos até esse mesmo momento. Uma vez que se pretende prever os caudais afluentes à EH Fridão nas horas seguintes ao momento da simulação e considerando que uma parte muito significativa do caudal afluente a esta secção depende do caudal registado na EH Ponte de Cavez, considerou-se que se teria de estimar os caudais no período de tempo correspondente ao passo de cálculo do modelo. Essa estimativa seria efetuada por extrapolação, assumindo que o comportamento do rio nas horas seguintes seria análogo ao observado na hora anterior. De modo a estimar esse caudal teve-se em consideração o declive do hidrograma de cheias no período entre a hora anterior ao instante do início da simulação e esse mesmo instante.

O passo de cálculo anteriormente referido foi estabelecido, procurando, por um lado, minimizar o número de vezes que o modelo correria e, por outro, evitar recorrer a modelos de previsão de precipitação, por estes aumentarem muito significativamente a complexidade do modelo. De facto, uma vez que decorre sempre um determinado período de tempo entre a ocorrência de um evento de precipitação e o momento em que o caudal gerado nas diferentes sub-bacias atingem a secção em estudo (EH Fridão), se o passo de cálculo adotado fosse suficientemente curto, poderia prescindir-se do uso dos referidos modelos de previsão de precipitação. Após várias simulações verificou-se que o passo de cálculo adequado seria de 3 horas.

Em sùmula, considerou-se que:

- Seria utilizado um passo de cálculo de 3h para a realização de simulações sucessivas;
- Seriam utilizados os registos dos caudais afluentes à secção da EH Ponte de Cavez até ao momento da simulação e, para as 3h subsequentes, estes caudais seriam obtidos, por extrapolação, da forma atrás descrita;
- Seriam considerados os valores de precipitação registados nas estações pluviométricas seleccionadas, nos 10 dias de antecedência ao instante inicial da simulação, ou seja, considerou-se precipitação nula a partir desse momento.

Em termos práticos, para cada simulação x ($T=tx$, em que tx se inicia em 0 e é incrementado, em cada simulação, do passo de cálculo de 3h):

- são estimados os caudais na EH Ponte Cavez entre $T=tx$ e $T=tx+3$;
- é considerada a precipitação ocorrida nos 10 dias anteriores à simulação (ou seja, até $T=tx$);
- corre-se o modelo de modo a obter uma estimativa dos valores de caudais na secção de Fridão, nas 3 horas seguintes;
- é efetuada uma comparação entre os caudais estimados para essas 3h e os níveis de alerta adiante definidos;
- 3h depois (aquando da simulação seguinte) é possível analisar a validade dos eventuais alertas gerados e iniciar uma nova simulação $x+1$.

Procedeu-se então à realização das simulações para todas as situações anteriormente identificadas (ver quadro 5.4). A sua análise permitiu identificar 2 níveis de alerta que permitiriam avisar atempadamente os intervenientes na obra, com suficiente antecedência.

Os dois níveis de alerta definidos foram os seguintes:

- Alerta de nível amarelo (vigilância): este alerta tem como objetivo avisar as entidades responsáveis pela obra a observar o desenvolvimento do rio nas próximas horas. Para este caso foi estipulado que o nível de alerta é emitido quando o caudal atinge, em Ponte Cavez, os $200\text{m}^3/\text{s}$;
- Alerta de nível de laranja: tem como objetivo alertar as entidades responsáveis de um possível galgamento do recinto da obra. Foi estipulado que este alerta é emitido, em Ponte Cavez, quando o caudal atinge valores de $340\text{m}^3/\text{s}$.

Nos próximos subcapítulos, são apresentados gráficos referentes às simulações alguns dos períodos indicados no quadro 5.4, de modo a não tornar demasiado extensa a apresentação de resultados. Serão apresentadas apenas três situações, mais concretamente, as situações 3, 4 e 5 apresentadas no quadro 5.4.

A escolha dessas situações deve-se ao facto de não só pertencerem ao mesmo ano hidrológico, mas também, de terem 3 estações pluviométricas em comum com registos, que caracterizam a precipitação ocorrida na bacia. Estas são as duas situações em que os hidrogramas simulados se aproximam mais dos hidrogramas observados, na realização do processo de calibração (apresentado anteriormente). Apresenta-se também a simulação 4 que, apesar do hidrograma de cheias simulado não aderir tão bem ao registado pela EH Fridão, é de prever que estas situações possam ocorrer no futuro, em que este processo de calibração na realidade não é efetuado e os parâmetros CN, Krec e rácio, serão estimados com base nos registos anteriores e na sensibilidade do utilizador do modelo. As restantes situações serão apresentadas no anexo (D).

5.5.1. SITUAÇÃO 3- 24/12 A 15/01 DO ANO HIDROLÓGICO 2015/2016

5.5.1.1. 24/12/2015 a 05/01/2016

A figura 5.20 ilustra a aplicação do modelo no período em questão.

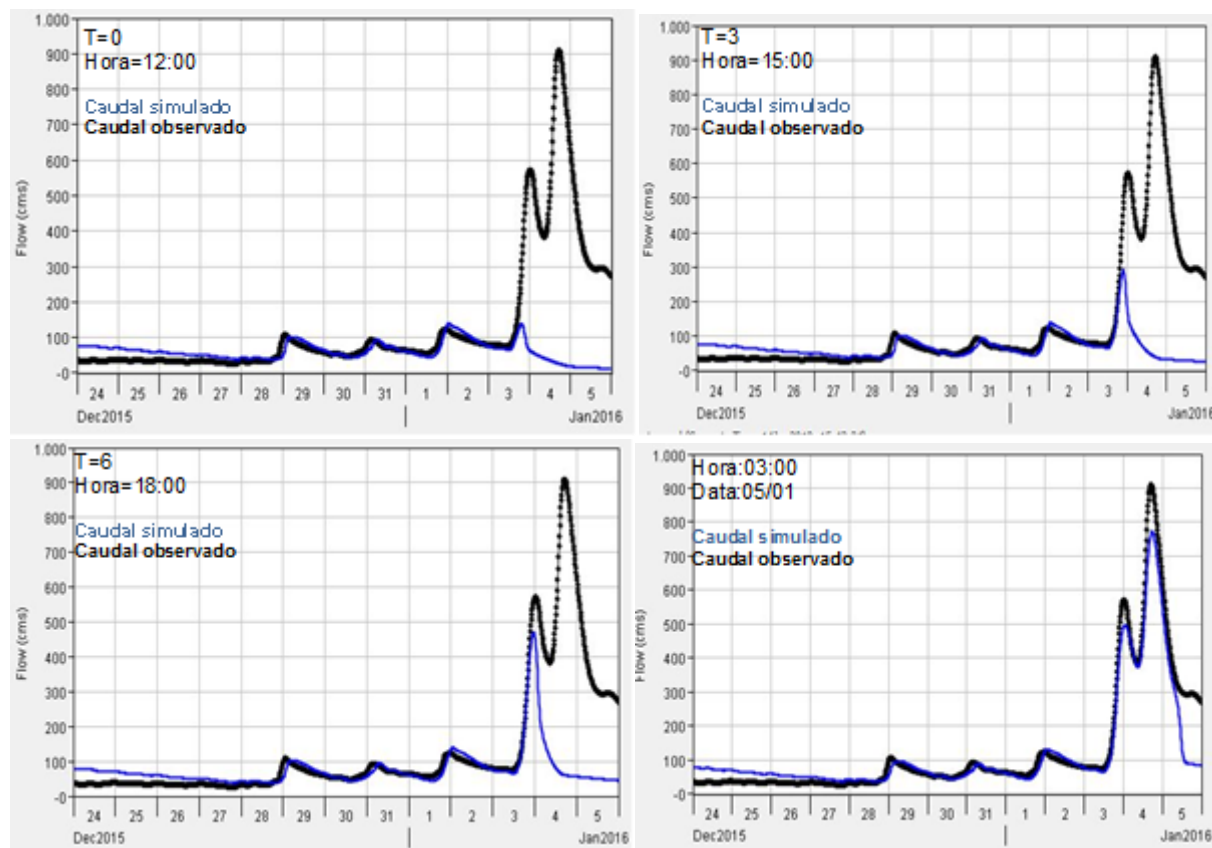


Figura 5.14- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 24/12/2015 e 05/01/2016

Analisando a figura apresentada, retiraram-se as seguintes afirmações:

- Para a primeira simulação $T=0$ não é emitido qualquer alerta;
- Para $T=3$ é emitido o alerta de vigilância;
- O alerta laranja é dado em $T=6$, prevendo o galgamento do recinto de obra;

Para o dia 05/01 às 3h é previsto o fim do alerta laranja.

Os quadros abaixo apresentados (quadros 5.6 e 5.7) contêm informação do caudal simulado (Q_{sim}) e o caudal observado (Q_{obs}) que traduzem os valores obtidos pela simulação e os valores registados pela EH de Fridão, respetivamente. Dessa informação, constata-se que alerta laranja é emitido para as 18:00 do dia 03/01/2016, verificando-se o galgamento da estrutura às 20h45 desse mesmo dia, ou seja, para este caso, as entidades teriam 2h45 para intervir na tomada de medidas de prevenção. Relativamente ao quadro 5.8, observa-se a emissão do fim do alerta de laranja para as 3h do dia 05/01/2016. No entanto, verifica-se que este só ocorreria às 8h15 do desse mesmo dia. De salientar que, nesta situação, não se apresenta o fim de alerta amarelo, visto que este não ocorre, ou seja, ao fim de alerta laranja, surge novo alerta laranja, como se poderá ver no ponto seguinte.

Quadro 5.6- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=3, com indicação da hora em que é estimado o alerta vigilância e a hora em que se verifica o galgamento

T=3			
DATA	HORA	Qmod	Qobs
03/jan/16	15:15	97.5	103.4
03/jan/16	15:30	102.2	108
03/jan/16	15:45	107.3	113.1
03/jan/16	16:00	112.7	118.4
03/jan/16	16:15	118.5	124.6
03/jan/16	16:30	124.9	131.2
03/jan/16	16:45	131.8	139.2
03/jan/16	17:00	139.6	148.9
03/jan/16	17:15	148.2	159.1
03/jan/16	17:30	157.5	170.3
03/jan/16	17:45	167.4	182.7
03/jan/16	18:00	177.6	196
03/jan/16	18:15	187.9	208.8
03/jan/16	18:30	198.3	222.9
03/jan/16	18:45	208.5	239.2
03/jan/16	19:00	218.7	256.3
03/jan/16	19:15	228.6	273.9

Quadro 5.7- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=6, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento

T=6			
DATA	HORA	Qsim	Qobs
03/jan/16	18:15	205.1	208.8
03/jan/16	18:30	219.5	222.9
03/jan/16	18:45	234.7	239.2
03/jan/16	19:00	250.5	256.3
03/jan/16	19:15	267	273.9
03/jan/16	19:30	284.4	294.9
03/jan/16	19:45	302.3	316.3
03/jan/16	20:00	320.5	338.3
03/jan/16	20:15	338.6	360.2
03/jan/16	20:30	356.3	383.4
03/jan/16	20:45	373.2	405.2
03/jan/16	21:00	389.1	427.7
03/jan/16	21:15	403.7	450.3

Quadro 5.6- Relação entre o caudal modelado e o caudal observado, com indicação do fim de alerta laranja

DATA	HORA	Qsim	Qobs
05/jan/16	03:15	416.4	484.1
05/jan/16	03:30	407.2	473.7
05/jan/16	03:45	398.3	462.6
05/jan/16	04:00	389.6	453.8
05/jan/16	04:15	381.4	444.7
05/jan/16	04:30	373.4	434.2
05/jan/16	04:45	365.9	426.3
05/jan/16	05:00	359	417.2
05/jan/16	05:15	352.5	408.6
05/jan/16	05:30	346.4	401.6
05/jan/16	05:45	340.7	394.1
05/jan/16	06:00	335.3	387.8

5.5.1.2.30/12/2015 a 09/01/2016

A figura 5.21 ilustra a aplicação do modelo no período em questão, em que constam 3 simulações para o dia 8/01/2016.

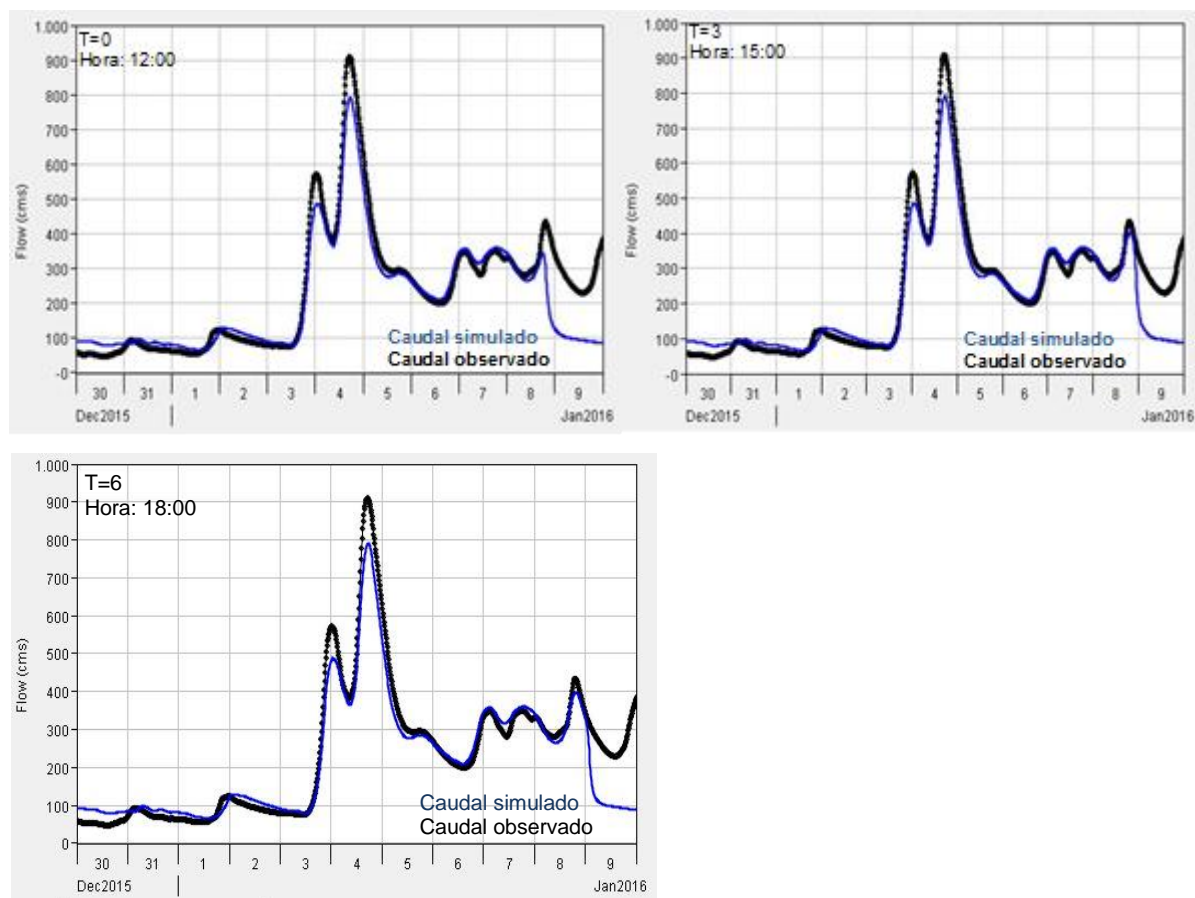


Figura 5.15- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 30/12/2015 e 09/01/2016

Analisando a figura apresentada, retiraram-se as seguintes afirmações:

- O alerta amarelo prevalece desde a simulação efetuada para o dia 3 (ver 5.5.1.1);
- O caudal simulado para a primeira simulação T=0 não é o suficiente para emitir o alerta laranja;
- O alerta laranja é dado em T=3, prevendo o galgamento do recinto de obra;
- Para T=6 é emitido o fim de alerta laranja.

O quadro abaixo apresentado (quadros 5.9) contém informação do caudal simulado (Q_{sim}) e o caudal observado (Q_{obs}) que traduzem os valores obtidos pela simulação e os valores registados pela EH de Fridão, respetivamente. Dessa informação, constata-se que alerta laranja é emitido para as 15:00 do dia 08/01/2016, verificando-se o galgamento da estrutura às 17h45 desse mesmo dia, ou seja, para este caso, as entidades teriam 2h45 para intervir na tomada de medidas de prevenção. Relativamente ao quadro 5.10, observa-se a emissão do fim do alerta de laranja para as 18h do dia 08/01/2016. No entanto, verifica-se que este só ocorreria às 00h15 do dia seguinte. De salientar que, nesta situação, não se apresenta o fim de alerta amarelo, visto que este não ocorre, ou seja, ao fim de alerta laranja, surge novo alerta laranja, como se poderá ver no ponto seguinte.

Quadro 5.9- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=3, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento

T=3			
DATA	HORA	Qsim	Qobs
08/jan/16	15:15	304.7	310.9
08/jan/16	15:30	310.9	314.9
08/jan/16	15:45	317.6	321.4
08/jan/16	16:00	324.7	329.1
08/jan/16	16:15	332.1	338.2
08/jan/16	16:30	339.6	346.9
08/jan/16	16:45	346.8	358.9
08/jan/16	17:00	353.6	370
08/jan/16	17:15	360	380.9
08/jan/16	17:30	365.8	392.3
08/jan/16	17:45	371	401.6
08/jan/16	18:00	375.7	411.2

Quadro 5.10- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=6, com indicação da hora em que é estimado o fim do alerta laranja

T=6			
DATA	HORA	Qsim	Qobs
08/jan/16	18:00	369.6	411.2
08/jan/16	18:15	374.2	419
08/jan/16	18:30	378.2	425.1
08/jan/16	18:45	381.5	430.5
08/jan/16	19:00	384.2	433.9
08/jan/16	19:15	386.2	434.4
08/jan/16	19:30	387.6	434.5
08/jan/16	19:45	387.9	432.3
08/jan/16	20:00	387.5	430.5
08/jan/16	20:15	386.2	426.1
08/jan/16	20:30	384.1	421.3
08/jan/16	20:45	381.2	416
08/jan/16	21:00	377.9	410.5
08/jan/16	21:15	374.1	403.9
08/jan/16	21:30	370	398.1
08/jan/16	21:45	365.8	392.5
08/jan/16	22:00	361.4	386.6
08/jan/16	22:15	357	380.4
08/jan/16	22:30	352.6	373.9
08/jan/16	22:45	348.1	369.6
08/jan/16	23:00	343.7	363.2
08/jan/16	23:15	339.3	357.5

5.5.1.3.31/12/2015 a 15/01/2016

A figura 5.22 ilustra a aplicação do modelo no período em questão, em que constam 6 simulações.

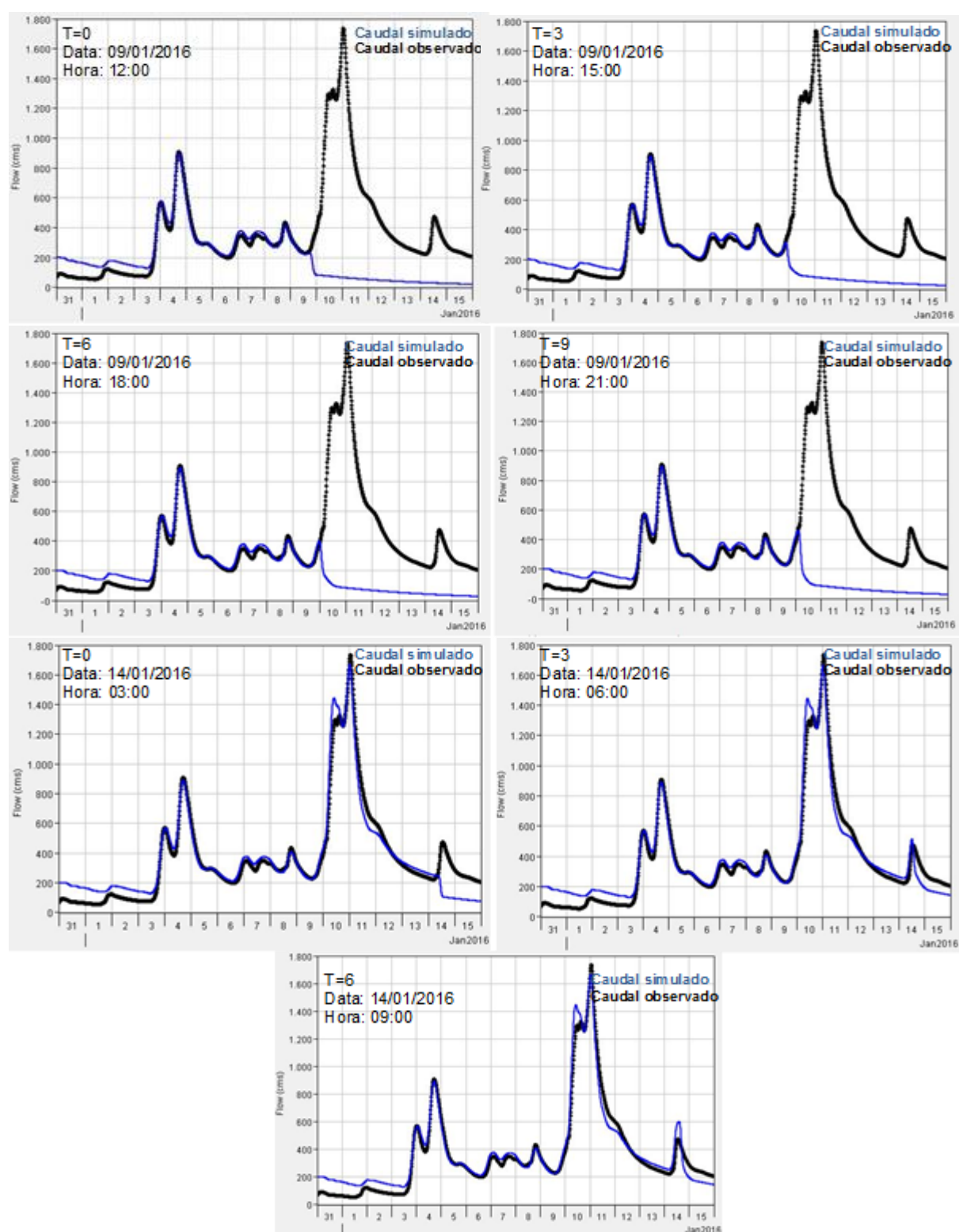


Figura 5.16- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 31/12/2015 e 16/01/2016

Analisando a figura apresentada, retiraram-se as seguintes afirmações no que respeita ao primeiro evento de cheia simulado com início no dia 09/01/2016:

- Para as simulações $T=0$ e $T=3$ não são emitidos alertas;
- O alerta laranja é dado em $T=9$, prevendo o galgamento do recinto de obra;

O fim do alerta laranja é dado para as 18h do dia 12/01/2016.

Recorrendo a uma análise da figura 5.22, para o evento com início no dia 14/01/16, retiraram-se as seguintes observações:

- Para a simulação $T=0$ não é emitido qualquer alerta;
- O alerta laranja é dado para $T=3$, prevendo o galgamento do recinto de obra;

Às 09h do dia 14/01/2016 é dado o fim de alerta laranja.

Os quadros abaixo apresentados (quadros 5.11 e 5.12) contêm informação do caudal simulado (Q_{sim}) e o caudal observado (Q_{obs}) que traduzem os valores obtidos pela simulação e os valores registados pela EH de Fridão, respetivamente.

Para o primeiro evento de precipitação (quadro 5.10), às 18h seria emitido o alerta laranja pois, ao simular o escoamento, prevê-se um caudal de 344m³/s às 21h, verificando-se que apenas mais tarde, às 00:45 do dia seguinte, ocorreria o galgamento das ensecadeiras. Assim, neste caso, as entidades intervenientes teriam aproximadamente um intervalo para agir de 6h45 entre o momento do alerta laranja e o galgamento do recinto de obra. Seguindo o mesmo raciocínio, para o segundo caso (quadro 5.11) o intervalo de tempo entre o alerta laranja e o galgamento seria de 5h15.

O fim do alerta laranja é dado no dia 12/01 às 18h, no entanto só se verificaria às 21h45 do mesmo dia, para o primeiro evento de precipitação. Relativamente ao segundo evento, é emitido o fim do alerta às 21h do dia 14/01 mas só se iria ser observado às 11h15 desse mesmo dia.

Quadro 5.11- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=6 do dia 14/01, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento

T6=18:00			
DATA	HORA	Qmod	Qobs
09/jan/16	18:00	261.5	249
09/jan/16	18:15	266.7	251.6
09/jan/16	18:30	272.4	255.2
09/jan/16	18:45	278.6	258.8
09/jan/16	19:00	285.1	263.9
09/jan/16	19:15	291.9	268.5
09/jan/16	19:30	298.9	274.3
09/jan/16	19:45	306.1	281.8
09/jan/16	20:00	313.5	288.4
09/jan/16	20:15	321.1	295.8
09/jan/16	20:30	328.8	303.4
09/jan/16	20:45	336.5	311.3
09/jan/16	21:00	344.3	318
09/jan/16	21:15	352.1	325.1
09/jan/16	21:30	359.6	331.2
09/jan/16	21:45	366.9	337.3
09/jan/16	22:00	373.6	343.5
09/jan/16	22:15	379.7	349.2
09/jan/16	22:30	385.1	355.4
09/jan/16	22:45	389.7	359.3
09/jan/16	23:00	393.4	364.2
09/jan/16	23:15	396.5	368.7
09/jan/16	23:30	398.6	372.6
09/jan/16	23:45	399.5	379.4
10/jan/16	00:00	398.8	384.9
10/jan/16	00:15	395.5	391.2
10/jan/16	00:30	388.3	398.9
10/jan/16	00:45	377.2	406.4

Quadro 5.12- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=3 do dia 14/01, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento

T3=06:00			
DATA	HORA	Qmod	Qobs
14/jan/16	06:15	262.3	228.3
14/jan/16	06:30	265.5	229.3
14/jan/16	06:45	269.4	231.4
14/jan/16	07:00	274.1	233.8
14/jan/16	07:15	279.8	236
14/jan/16	07:30	287	239.1
14/jan/16	07:45	295.7	241.9
14/jan/16	08:00	306.2	245.4
14/jan/16	08:15	318.5	249.1
14/jan/16	08:30	332.6	253.3
14/jan/16	08:45	348.2	258.2
14/jan/16	09:00	365.1	264.8
14/jan/16	09:15	382.7	272.9
14/jan/16	09:30	401.1	284.3
14/jan/16	09:45	419.3	297.4
14/jan/16	10:00	437.2	313.4
14/jan/16	10:15	454	331.8
14/jan/16	10:30	469.4	350.8
14/jan/16	10:45	482.8	370.5
14/jan/16	11:00	494.4	390.6
14/jan/16	11:15	504	408.6

5.5.2.SITUAÇÃO 4- 01/02 A 16/02 DO ANO HIDROLÓGICO 2015/2016

A figura 5.23 ilustra a aplicação do modelo no período em questão.

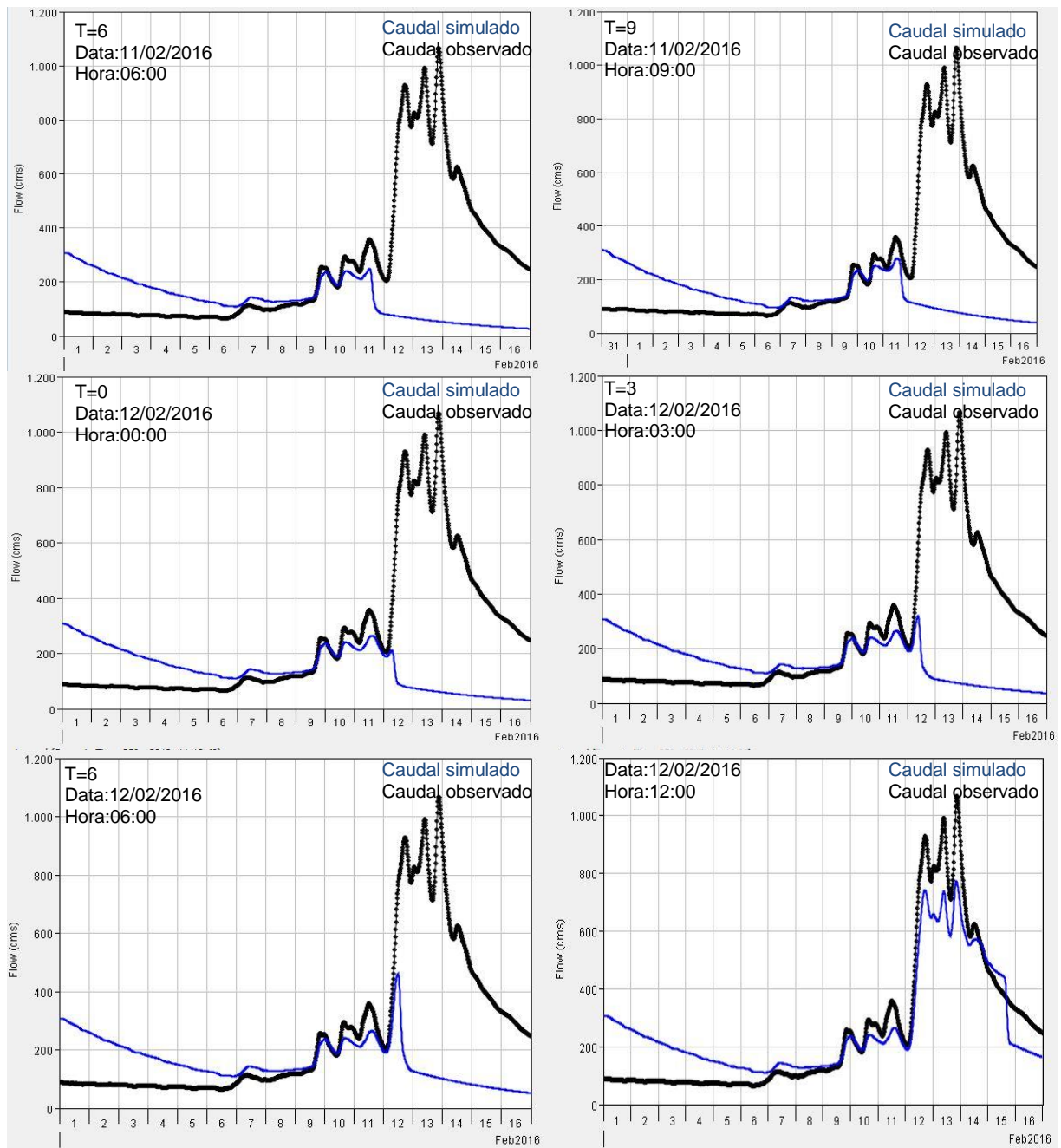


Figura 5.17- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 01/02/2016 e 16/02/2016

Analisando a figura apresentada, retiraram-se as seguintes afirmações:

- Para as simulações realizadas no dia 11/02 não é emitido qualquer alerta;
- Para T=0 e T=3 do dia 12/02 não são emitidos alertas;
- O alerta laranja é dado em T=6 do dia 12/02, prevendo o galgamento do recinto de obra;

Para o dia 15/21 às 12h é previsto o fim do alerta laranja.

Os quadros abaixo apresentados (quadros 5.13 e 5.14) contêm informação do caudal simulado (Qsim) e o caudal observado (Qobs) que traduzem os valores obtidos pela simulação e os valores registados pela EH de Fridão, respetivamente. Dessa informação, constata-se que alerta laranja é emitido para 06:00 do dia 12/02/2016, verificando-se o galgamento da estrutura às 7h15 desse mesmo dia, ou seja, para este caso, as entidades teriam 1h15 para intervir na tomada de medidas de prevenção. Relativamente ao quadro 5.14, observa-se a emissão do fim do alerta de laranja para as 12h do dia 15/02/2016. No entanto, verifica-se que este só ocorreria às 20h45 do desse mesmo dia. De salientar que, nesta situação, não se apresenta o fim de alerta amarelo, visto que este ocorre fora do período de simulação.

Quadro 5.7 Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=6, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento

T=6			
DATA	HORA	Qsim	Qobs
12Feb2016	06:15	287.6	345.9
12Feb2016	06:30	297.8	362
12Feb2016	06:45	308	377.8
12Feb2016	07:00	318.4	393
12Feb2016	07:15	328.9	408.3
12Feb2016	07:30	339.7	424.4
12Feb2016	07:45	350.9	443.3
12Feb2016	08:00	362.8	461.7
12Feb2016	08:15	375.1	480.5
12Feb2016	08:30	387.8	500.1
12Feb2016	08:45	400.5	520.3
12Feb2016	09:00	412.9	541.9

Quadro 5.8- Relação entre caudal modelado e caudal observado para o dia 15/02, com indicação da hora em que é estimado o fim do alerta laranja

DATA	HORA	Qsim	Qobs
15Feb2016	12:00	447.7	391
15Feb2016	12:15	447.1	389.7
15Feb2016	12:30	446.5	388.8
15Feb2016	12:45	445.8	387.5
15Feb2016	13:00	445.2	386.5
15Feb2016	13:15	444.5	384.5
15Feb2016	13:30	443.8	383.1
15Feb2016	13:45	443	382.3
15Feb2016	14:00	442.1	380.6
15Feb2016	14:15	441	379.9
15Feb2016	14:30	439.5	378.6
15Feb2016	14:45	437.2	377.4
15Feb2016	15:00	433.3	375.8
15Feb2016	15:15	427.1	374.3
15Feb2016	15:30	417.3	373.3
15Feb2016	15:45	403.3	371.9
15Feb2016	16:00	385.6	370.5
15Feb2016	16:15	364.9	368.8
15Feb2016	16:30	342.1	366.7
15Feb2016	16:45	338.7	363.4

5.5.3.SITUAÇÃO 5- 18/03 A 18/04 DO ANO HIDROLÓGICO 2015/2016

Para este intervalo, as simulações resultantes estão representadas nos gráficos seguintes (na figura 5.24 apresentam-se os resultados para a cheia de 28/03/2016 e na figura 5.25, os da cheia do dia 29/03/2016).

5.5.3.1.18/03/2016 a 31/03/2016

A figura 5.24 ilustra a aplicação do modelo no período em questão.

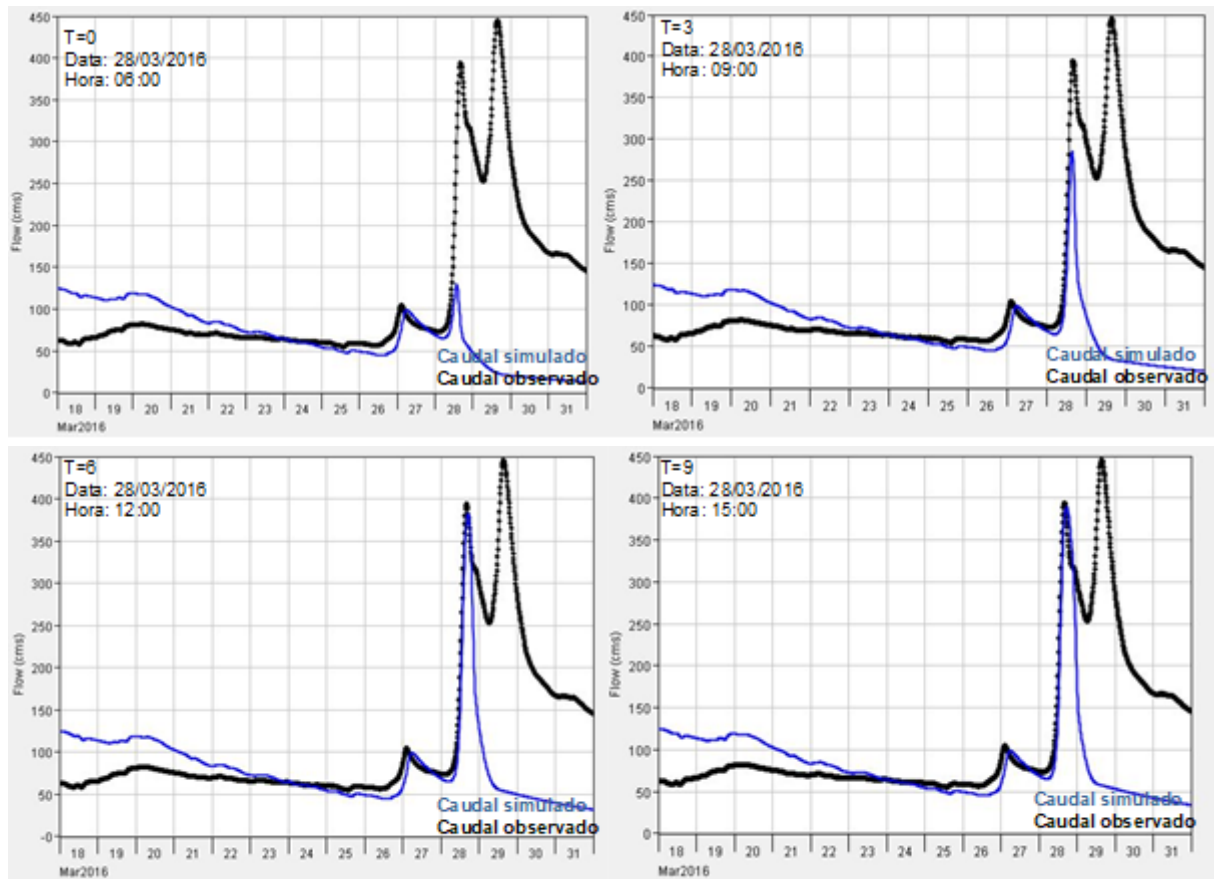


Figura 5.18- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 18/03/2016 e 31/03/2016

Relativamente ao dia 28/03/2016 (figura 5.24), é possível afirmar que:

- Para T=0 não é emitido qualquer tipo de alerta;
- Para T=3 é acionado o alerta vigilância;
- Para T=6 é emitido o alerta laranja sem que se verifique o galgamento da estrutura;
- Para T=9 é dado o fim do alerta laranja;

De salientar que, nesta situação, não se apresenta o fim de alerta amarelo, visto que este não ocorre, ou seja, ao fim de alerta laranja, surge novo alerta laranja, como se poderá ver no evento seguinte.

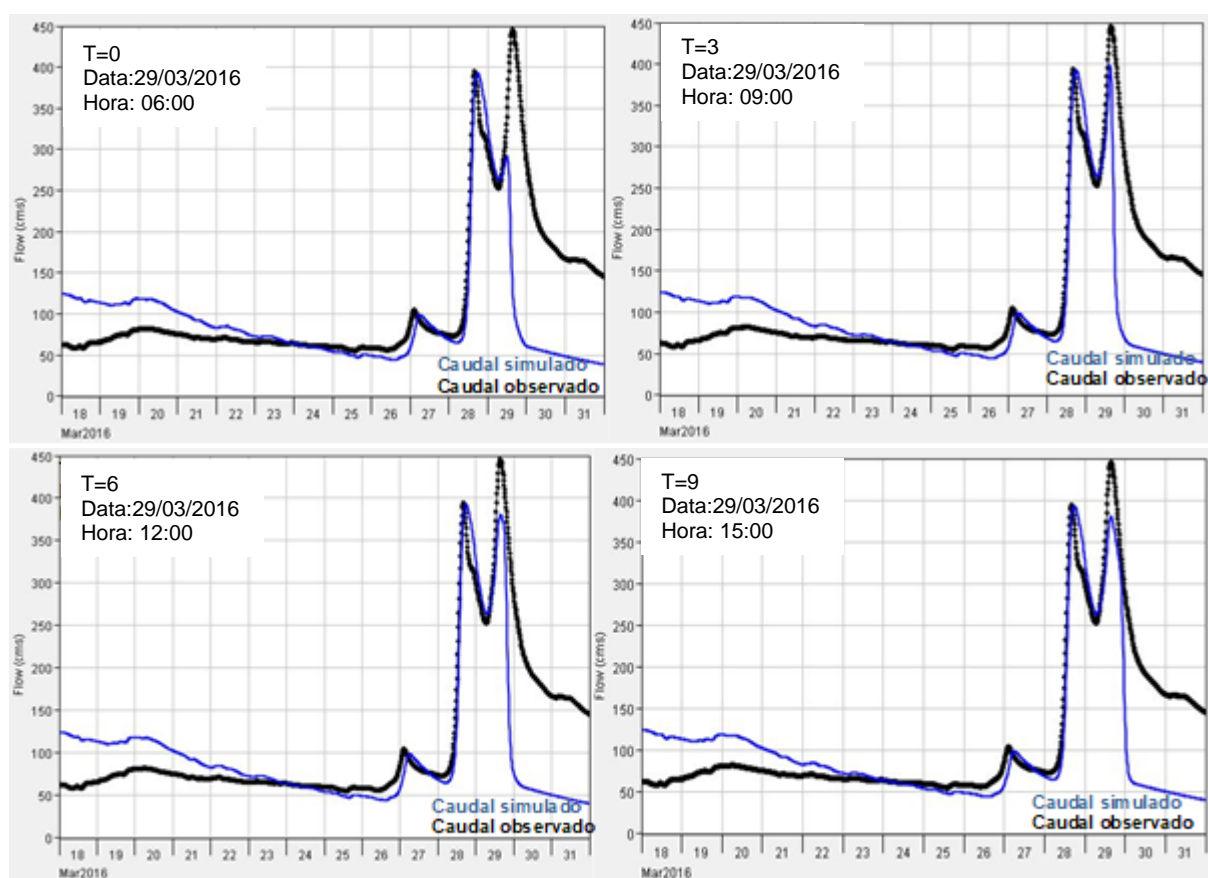


Figura 5.19- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 18/03/2016 e 31/03/2016

Relativamente às simulações realizadas para dia 29/03/2016 (figura 5.25) observa-se que:

- Para T=0 não emite qualquer alerta;
- Para T=3 é emitido o alerta laranja sem se verificar o galgamento do recinto de obra;
- Para T=6 é dado o fim de alerta laranja;
- Para T=9 é dado o fim do alerta vigilância;

O quadro 5.15 relacionam os caudais simulados com os caudais registados para as simulações anteriormente apresentadas com um passo temporal de 15min.

Da informação presente nesse quadro constata-se que para T=6 é emitido um alerta, no entanto, não se verifica o galgamento pois o caudal máximo registado pela EH é de 394.4m³/s, não sendo o suficiente para provocar o efeito de galgamento. Por outro lado, na simulação T=6 realizada no dia 29/03/2016, é dado o alerta laranja e, analisando os registos da EH Fridão, estima-se que o galgamento do recinto da obra ocorreria por volta das 13h30. Como o alerta é emitido às 9:00 desse mesmo dia, o desfasamento entre o alerta e o galgamento das ensecadeiras seria de 4h30. No dia 30/03/2016 às 03h00 é estimado o fim do alerta vigilância, no entanto, só se verificaria as 9h45 desse mesmo dia.

Quadro 5.9- Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=6 do dia 28/03 e T=3 do dia seguinte, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento para o caso de T=3

T=6				T=3			
DATA	HORA	Qsim	Qobs	DATA	HORA	Qsim	Qobs
28/mar/16	12:15	152.1	202.2	29/mar/16	09:15	272.6	275.6
28/mar/16	12:30	166.3	216.6	29/mar/16	09:30	275.1	280.3
28/mar/16	12:45	182.1	232.1	29/mar/16	09:45	277.8	284.3
28/mar/16	13:00	199.2	248.4	29/mar/16	10:00	280.8	288.3
28/mar/16	13:15	217.1	264.7	29/mar/16	10:15	283.9	293.2
28/mar/16	13:30	235.3	281.7	29/mar/16	10:30	287	298.1
28/mar/16	13:45	253.5	299.4	29/mar/16	10:45	290.2	303.2
28/mar/16	14:00	271.3	317.2	29/mar/16	11:00	293.4	308.2
28/mar/16	14:15	288.5	332.1	29/mar/16	11:15	296.7	315.2
28/mar/16	14:30	304.8	347.2	29/mar/16	11:30	300.2	322.2
28/mar/16	14:45	319.8	358.6	29/mar/16	11:45	304.1	331
28/mar/16	15:00	333.5	370.1	29/mar/16	12:00	308.6	339.8
28/mar/16	15:15	345.2	379.2	29/mar/16	12:15	314.1	351
28/mar/16	15:30	355.2	388.2	29/mar/16	12:30	320.5	362.4
28/mar/16	15:45	363.3	391.3	29/mar/16	12:45	327.8	373.4
28/mar/16	16:00	369.6	394.4	29/mar/16	13:00	335.9	384.5
28/mar/16	16:15	374.4	393.7	29/mar/16	13:15	344.6	395
28/mar/16	16:30	377.8	393	29/mar/16	13:30	353.5	405.6
28/mar/16	16:45	380.2	390.5				
28/mar/16	17:00	381.6	387.9				

5.5.3.2.05/04/2016 a 18/04/2016

Relativamente ao intervalo compreendido entre 05/04/2016 e 18/04/2016 os resultados estão ilustrados na figura 5.26.

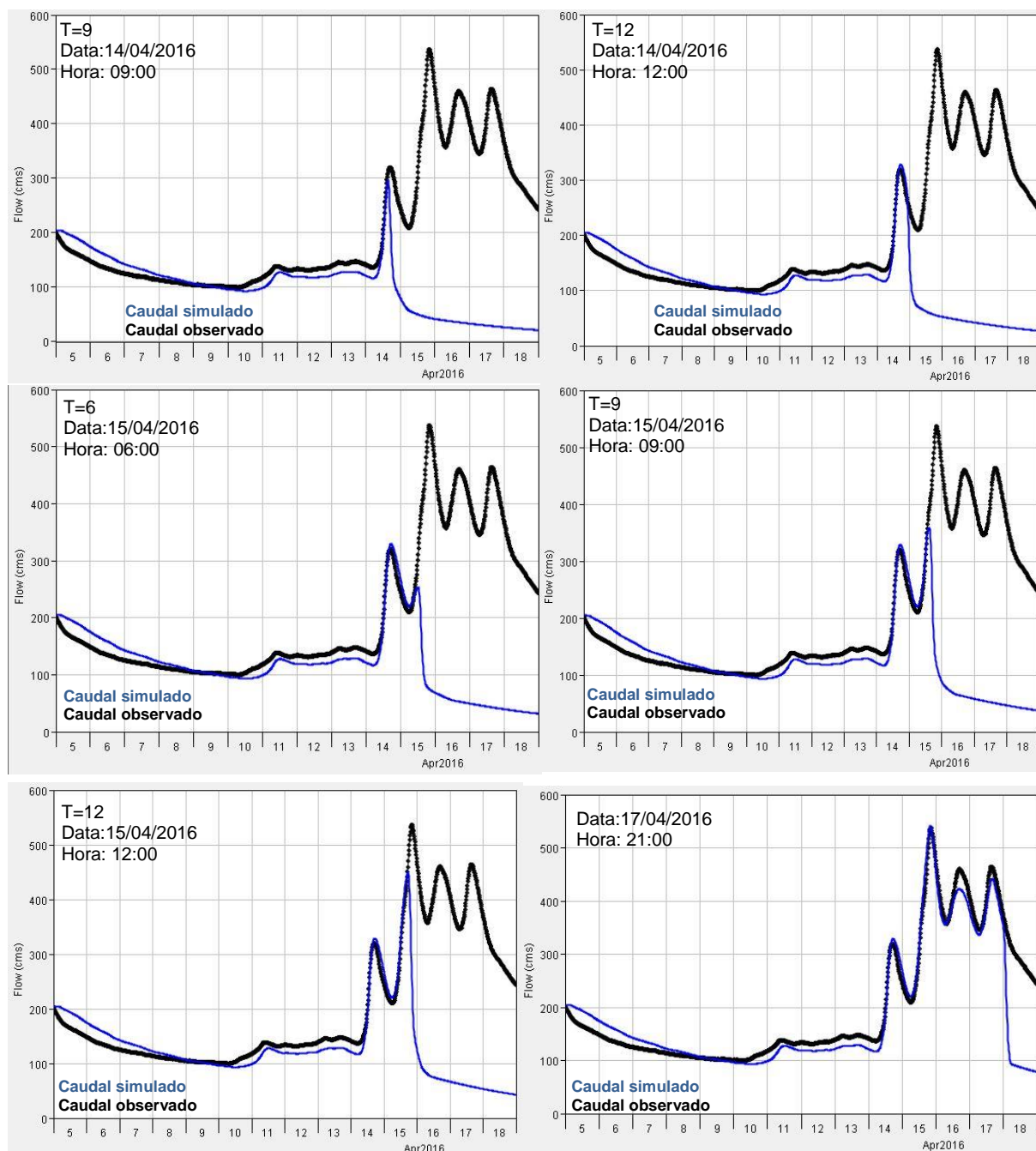


Figura 5.20- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 05/04/2016 e 18/04/2016

Na figura anterior estão ilustradas as simulações consideradas de maior relevância para o estudo, em que se podem tirar as seguintes observações, recorrendo à sua análise:

- Para T=9 do dia 14/04 é emitido o alerta vigilância;
- Para T=9 do dia 15/04 é emitido o alerta laranja verificando-se o galgamento da estrutura;

No dia 17/04 às 21h00 é dado como fim o alerta laranja.

Os quadros abaixo apresentados (quadros 5.16 e 5.17) contêm informação do caudal simulado (Qsim) e o caudal observado (Qobs) que traduzem os valores obtidos pela simulação e os valores registados pela EH de Fridão, respetivamente.

Dessa informação, constata-se que alerta laranja é emitido para as 09h00 do dia 15/04/2016, verificando-se o galgamento da estrutura às 15h15 desse mesmo dia, ou seja, para este caso, as entidades teriam 6h15 para intervir na tomada de medidas de prevenção. Relativamente ao quadro 5.17, observa-se a emissão do fim do alerta de laranja para as 18h do dia 17/04/2016. No entanto, verifica-se que este só ocorreria às 2h30 do dia seguinte. De salientar que, nesta situação, o fim do alerta de vigilância não consegue ser estimado pelo facto de ocorrer fora do período utilizado para simulação.

Quadro 5.16 Relação entre caudal modelado e caudal observado para T=9 do dia 15/04, com indicação da hora em que é estimado o alerta laranja e a hora em que se verifica o galgamento

T=9			
DATA	HORA	Qsim	Qobs
15Apr2016	9:15	244.3	235.7
15Apr2016	9:30	248.6	239.5
15Apr2016	9:45	253.3	244
15Apr2016	10:00	258.5	248.5
15Apr2016	10:15	264.3	252.9
15Apr2016	10:30	270.6	257.2
15Apr2016	10:45	277.5	263.3
15Apr2016	11:00	284.8	269.4
15Apr2016	11:15	292.4	275.6
15Apr2016	11:30	300.2	282.6
15Apr2016	11:45	307.9	291.6
15Apr2016	12:00	315.5	300.7
15Apr2016	12:15	322.6	311
15Apr2016	12:30	329.2	321.3
15Apr2016	12:45	335.1	330.5
15Apr2016	13:00	340.3	339.7
15Apr2016	13:15	344.7	348.7
15Apr2016	13:30	348.5	357.8
15Apr2016	13:45	351.6	364.9
15Apr2016	14:00	354.2	372
15Apr2016	14:15	356.3	378.7
15Apr2016	14:30	357.8	385.4
15Apr2016	14:45	358.5	390
15Apr2016	15:00	356.9	394.6
15Apr2016	15:15	354.2	400
15Apr2016	15:30	351.7	405.3

Quadro 5.10- Relação entre caudal modelado e caudal observado para o dia 17/04, com indicação da hora em que é estimado o fim do alerta laranja

DATA	HORA	Qsim	Qobs
17Apr2016	21:15	385.9	407.2
17Apr2016	21:30	382.8	403.7
17Apr2016	21:45	379.7	400.3
17Apr2016	22:00	376.6	396.9
17Apr2016	22:15	373.7	394.1
17Apr2016	22:30	370.7	391.3
17Apr2016	22:45	367.7	387.4
17Apr2016	23:00	364.7	383.6
17Apr2016	23:15	361.6	380.1
17Apr2016	23:30	358.5	376.7
17Apr2016	23:45	355.5	373.4
18Apr2016	00:00	352.8	370
18Apr2016	00:15	350.2	367.4
18Apr2016	00:30	347.7	364.7
18Apr2016	00:45	345.3	361.7
18Apr2016	01:00	343	358.8
18Apr2016	01:15	340.7	356.1
18Apr2016	01:30	338.4	353.3

5.5.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das simulações efetuadas permitiu determinar em que momentos o sistema de alerta de cheias em obra desenvolvido emite os alertas de vigilância e laranja e, no caso de se prever o esgotamento da capacidade de vazão da galeria de desvio provisório (400 m³/s) e consequente galgamento das ensecadeiras e inundação do recinto da obra, calcular o desfasamento entre o momento em que é acionado o alerta laranja e o momento em que são atingidos os 400 m³/s. Nos quadros seguintes, 5.18 e 5.19 é efetuada uma síntese das simulações realizadas para as situações consideradas neste estudo. Nestes quadros incluem-se os níveis, data e hora dos alertas emitidos, data e hora de provável ocorrência

do galgamento das ensecadeiras e desfasamento entre a emissão do alerta laranja e a ocorrência do referido galgamento.

Quadro 5.11-Representação do nível, data e hora do alerta, ocorrência do galgamento e o respectivo desfasamento para todos os eventos considerados sujeitos a análise para os anos hidrológicos 2008/2009 e 2009/2010

Data	Hora	Nível de alerta	Caudal (m3/s)	Ocorrência de galgamento		Desfasamento
				Data	Hora	
23/01/2009	21:00	Alerta vigilância	200	24/01/2009	02:15	02:15
24/01/2009	00:00	Alerta laranja	340			
24/01/2009	06:00	Fim alerta laranja	340			
24/01/2009	12:00	Fim alerta vigilância	-			
04/02/2009	12:00	Alerta vigilância	200	Não se prevê ocorrência de galgamento		-
05/02/2009	03:00	Alerta laranja	340			
05/02/2009	06:00	Fim alerta laranja	340			
09/02/2009	09:00	Fim alerta vigilância	200			
09/02/2009	18:00	Alerta vigilância	200	09/02/2009	23:45	02:45
09/02/2009	21:00	Alerta laranja	340			
10/02/2009	03:00	Fim alerta laranja	340			
09/02/2009	09:00	Fim alerta vigilância	200			
06/12/2009	00:00	Alerta vigilância	200	Prevê-se ocorrência de galgamento mas não se verifica		-
06/12/2009	09:00	Alerta laranja	340			
06/12/2009	15:00	Fim alerta laranja	340			
-	-	Fim alerta vigilância	-			
-	-	Alerta vigilância	-	07/12/2009	01:30	04:30
06/12/2009	21:00	Alerta laranja	340			
07/12/2009	12:00	Fim alerta laranja	340			
07/12/2009	18:00	Fim alerta vigilância	200			
21/12/2009	18:00	Alerta vigilância	200	22/12/2009	01:45	04:45
21/12/2009	21:00	Alerta laranja	340			
26/12/2009	03:00	Fim alerta laranja	340			
26/12/2009	09:00	Fim alerta vigilância	200			
28/12/2009	00:00	Alerta vigilância	200	28/12/2009	08:45	05:45
28/12/2009	03:00	Alerta laranja	340			
02/01/2010	18:00	Fim alerta laranja	340			
-	-	Fim alerta vigilância	-			
-	-	Alerta vigilância	-	03/01/2010	08:30	05:30
03/01/2010	03:00	Alerta laranja	340			
05/01/2010	12:00	Fim alerta laranja	340			
07/01/2010	06:00	Fim alerta vigilância	-			
12/01/2010	09:00	Alerta vigilância	200	12/01/2010	14:30	02:30
12/01/2010	12:00	Alerta laranja	340			
13/01/2010	03:00	Fim alerta laranja	340			
-	-	Fim alerta vigilância	-			
-	-	Alerta vigilância	-	13/01/2010	14:00	05:00
13/01/2010	09:00	Alerta laranja	340			
15/01/2010	15:00	Fim alerta laranja	340			
-	-	Fim alerta vigilância	-			
-	-	Alerta vigilância	-	16/01/2010	13:15	04:15
16/01/2010	09:00	Alerta laranja	340			
18/01/2010	06:00	Fim alerta laranja	340			
21/01/2010	18:00	Fim alerta vigilância	200			

Quadro 5.12- Representação do nível, data e hora do alerta, ocorrência do galgamento e o respectivo desfasamento para todos os eventos considerados sujeitos a análise para os anos hidrológicos 2008/2009 e 2015/2016

Data	Hora	Nível de alerta	Caudal (m3/s)	Ocorrência de galgamento		Desfasamento
				Data	Hora	
03/01/2016	15:00	Alerta vigilância	200	03/01/2016	20:45	02:45
03/01/2016	18:00	Alerta laranja	340			
05/01/2016	06:00	Fim alerta laranja	340			
06/01/2016	03:00	Fim alerta vigilância	200			
06/01/2016	18:00	Alerta vigilância	200	08/01/2016	17:45	02:45
08/01/2016	15:00	Alerta laranja	340			
08/01/2016	18:00	Fim alerta laranja	340			
-	-	Fim alerta vigilância	200			
-	-	Alerta vigilância	-	10/01/2016	00:45	06:45
09/01/2016	18:00	Alerta laranja	340			
12/01/2016	18:00	Fim alerta laranja	340			
-	-	Fim alerta vigilância	200			
-	-	Alerta vigilância	-	14/01/2016	11:15	05:15
14/01/2016	06:00	Alerta laranja	340			
14/01/2016	21:00	Fim alerta laranja	340			
15/01/2016	21:00	Fim alerta vigilância	200			
12/02/2016	00:00	Alerta vigilância	200	12/02/2016	07:15	01:15
12/02/2016	06:00	Alerta laranja	340			
15/02/2016	15:00	Fim alerta laranja	340			
17/02/2016	09:00	Fim alerta vigilância	200			
28/03/2016	09:00	Alerta vigilância	200	Não se prevê ocorrência de galgamento		-
28/03/2016	12:00	Alerta laranja	340			
28/03/2016	15:00	Fim alerta laranja	340			
30/03/2016	03:00	Fim alerta vigilância	200			
14/04/2016	06:00	Alerta vigilância	200	15/04/2016	15:15	06:15
15/04/2016	09:00	Alerta laranja	340			
18/04/2016	21:00	Fim alerta laranja	340			
21/04/2016	00:00	Fim alerta vigilância	200			
03/02/2017	06:00	Alerta vigilância	200	03/02/2017	11:15	05:15
03/02/2017	06:00	Alerta laranja	340			
03/02/2017	09:00	Fim alerta laranja	340			
03/02/2017	15:00	Fim alerta vigilância	200			
03/02/2017	18:00	Alerta vigilância	200	04/02/2017	01:00	04:00
03/02/2017	21:00	Alerta laranja	340			
05/02/2017	15:00	Fim alerta laranja	340			
06/02/2017	09:00	Fim alerta vigilância	200			

Em síntese, verifica-se que:

- Das 20 situações simuladas, em todas seriam emitidos alertas laranja;
- Das 20 situações em que o alerta laranja seria emitido, prevê-se que ocorresse o galgamento das enseadeiras em 17 situações
- O desfasamento mínimo obtido foi de 1h15 e o máximo de 6h45, tendo-se determinado ainda um desfasamento médio, considerando todos os eventos, foi 4h30.

O desfasamento mínimo de 1h15 ocorre para a situação 4 (ver quadro 5.4), cujo hidrograma pode ser consultado na figura 5.23. Como referido anteriormente, na análise desse gráfico, é notável a falta de escoamento originada pela falta de precipitação, podendo estar relacionada com as estações pluviométricas que caracterizam a bacia. Essa diferença significativa entre o escoamento simulado e o escoamento observado origina um aviso de alerta laranja mais tardio e consequentemente, um desfasamento menor.

Apesar de nas simulações apresentadas terem sido utilizadas diferentes estações pluviométricas, de acordo com a disponibilidade de dados em cada situação, pretende-se que durante a implementação do modelo de alerta de cheias aqui apresentado, apenas sejam usadas um conjunto fixo de estações (facilidade de implementação do modelo), das quais será necessário obter dados em tempo real.

Deste modo, procurou-se definir as estações pluviométricas que caracterizassem com fiabilidade o modelo meteorológico.

As situações 3 e 5 (quadro 5.4) mostram ser as que melhor caracterizam o escoamento na secção intermédia, tendo em comum 3 estações pluviométricas sendo elas Ponte Cavez, Celorico de Basto e Lamas de Alvadia. Uma outra estação, Cabeceiras de Basto, é utilizada para caracterizar a situação 3, mais propriamente a sub-bacia TAM16.

Nesse sentido, foi efetuado novamente uma simulação para o período compreendido na situação 3 mas, desta vez, apenas com 3 estações pluviométricas (Ponte Cavez, Celorico de Basto e Lamas de Alvadia), substituindo-recorrendo ao método de Thiessen- a estação Cabeceiras de Basto pela estação de Ponte Cavez para a sub-bacia TAM16.

Os resultados obtidos podem ser consultados no anexo (D) e revelam que a exclusão da estação de Cabeceiras de Basto não tem impacto nos caudais obtidos na simulação, não alterando os momentos em que os alertas são dados e, consequentemente, o desfasamento. Aparentemente, parece ser suficiente utilizar apenas os valores de precipitação (no período de implementação estes dados terão de estar disponíveis em tempo real) das estações pluviométricas de Ponte Cavez, Celorico de Basto e Lamas de Alvadia para caracterizar a distribuição da precipitação na bacia simulada. Ainda assim, seria interessante verificar mais situações (situação a acompanhar no futuro) que corroborassem esta hipótese.

5.6.COMENTÁRIOS FINAIS

Tendo em vista o objetivo de implementação de um sistema de alerta de cheias em obra que seja capaz de prever e alertar atempadamente situações de potencial inundação do recinto da obra do AH de Fridão, o modelo apresentado neste capítulo revelou ser eficaz na previsão dessas mesmas situações, com um desfasamento médio de 4h30 entre o alerta laranja e o galgamento das ensecadeiras.

O modelo, apesar da sua eficácia, tem um grau de complexidade superior em comparação aos modelos (ver 2.2.1) implementados pela EDP Produção para os AH de Foz Tua e do Baixo Sabor. A sua complexidade deve-se, essencialmente, à necessidade de recorrer a um programa de simulação hidrológica, neste caso, o HEC-HMS, e de obter dados pluviométricos das estações da rede hidrometeorológica nacional (APA).

Relativamente ao programa de simulação, verificam-se vários constrangimentos, nomeadamente:

- A sensibilidade do modelo aos parâmetros de calibração, principalmente ao número de escoamento;
- A necessidade automatizar as tarefas de carregar os dados hidrometeorológicos no modelo e de o correr (de 3 em 3 horas);

Para obviar ao primeiro aspeto referido, será importante acompanhar os valores de escoamento verificados na bacia hidrográfica para o período antecedente à simulação. Por outro lado, será também muito importante a experiência e sensibilidade do operador do modelo de simulação.

Relativamente ao segundo aspeto, a EDP Produção terá de tomar ações no sentido de programar as diferentes tarefas e, em paralelo, testar o funcionamento do modelo neste tipo de funcionamento automático/autónomo.

No que respeita às estações pluviométricas (rede nacional – APA), estando já definidas quais as estações que, à partida, melhor caracterizam a precipitação da bacia simulada, verifica-se que será necessário obter os dados pluviométricos com um intervalo máximo de 3h. Para tal, a EDP Produção terá de tomar diligências para garantir a teletransmissão dos dados com a frequência pretendida. De facto, atualmente, o portal público do SNIRH apenas disponibiliza os dados até às últimas 24h.

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS**6.1. CONCLUSÕES**

De um modo geral, a existência de sistemas de monitorização, alerta e aviso de cheias em obra facilita a prevenção de situações de emergência, proporcionando às entidades responsáveis a capacidade de agir de modo a garantir a proteção de recursos humanos, materiais e ambientais.

Tendo isso em consideração, o objetivo principal, na realização desta dissertação, passou pelo desenvolvimento de um modelo de alerta de cheias em obra a implementar na fase de construção do aproveitamento hidroelétrico de Fridão, capaz de alertar sobre a iminência de situações de cheia, de forma as entidades intervenientes garantirem a proteção de bens materiais e ambientais.

Um fator fundamental na definição de um modelo de alerta de cheias passa pelo conhecimento das características da de derivação de obra, nomeadamente o caudal de dimensionamento, no caso de se recorrer ao desvio por galeria provisória. Para o caso do AH destinado à implementação do modelo de alerta de cheias, foi estipulado no Projeto um caudal de dimensionamento de 400 m³/s.

Inicialmente, pretendia-se desenvolver um modelo de alerta de cheias, análogo aos desenvolvidos pela EDP Produção, que relacionasse as séries de dados de estações hidrométricas localizadas na bacia hidrográfica e um modelo de alerta com base num modelo numérico de precipitação/escoamento utilizando um software de simulação hidrológica.

No entanto, desde cedo se concluiu que a solução desenvolvida com recurso à correlação entre os registos de EH da bacia do Tâmega não teria interesse prático pois a sua aplicação só é exequível em cursos de água de regime natural e, atualmente, nesta bacia, estão em fase de construção um conjunto de AH pertencentes à Iberdrola que, após a sua entrada em funcionamento, irão modificar o regime natural do rio. Ainda assim, num exercício estritamente teórico, efetuou-se a comparação entre os registos das EH Ponte de Cavez e Fridão, tendo-se concluído que não existia uma forte correlação entre os registos das duas estações.

Nesse contexto, foi dada uma maior ênfase ao desenvolvimento do modelo de alerta de cheias com recurso a um modelo numérico de precipitação/escoamento utilizando um *software* de simulação de eventos de cheia, HEC-HMS.

Com base nos dados registados pelas estações hidrométricas de Fridão e na realização de várias simulações para os diversos anos hidrológicos, procedeu-se à definição do modelo de alerta de cheias e à definição dos níveis de alerta (vigilância e alerta laranja) associados a valores de caudais registados na estação hidrométrica de Fridão. Para o nível de alerta vigilância, foi estabelecido um caudal de 200 m³/s e para o nível de alerta laranja um caudal de 340 m³/s. Definidos os níveis de alerta, o modelo foi testado para diversos eventos ocorridos nos anos hidrológicos 2008/2009, 2009/2010, 2015/2016 e 2016/2017, tendo-se verificado que, dos 20 alertas laranja emitidos, em 17 deles ocorreria, segundo os registos da EH Fridão, o esgotamento da capacidade de vazão da galeria de derivação provisória (400 m³/s) e consequente galgamento do recinto de obra.. Nestas 17 situações o desfasamento médio entre a

hora em que o alerta seria emitido e a hora em que se prevê ocorrer o galgamento das ensecadeiras foi de 4h30, nunca sendo inferior a 1h15.

Outro aspeto testado relaciona-se com as estações pluviométricas que melhor caracterizam o modelo meteorológico da bacia, tendo-se concluído que a melhor escolha recai sobre as EP Ponte Cavez, Celorico de Basto e Lamas de Alvadia. No entanto, é de salientar que esta análise apenas foi efetuada para duas situações, as únicas disponíveis para análise.

Os resultados obtidos para o modelo de alerta de cheias definido foram bastante satisfatórios na medida em que permitem prever de forma eficaz e antecipada os eventos de cheia para os anos hidrológicos que serviram de alvo de estudo.

Na conceção do modelo, no entanto, foram evidentes algumas limitações por parte do *software* HEC-HMS. Neste estudo, as limitações fizeram-se sentir na obtenção dos hidrogramas de cheia simulados, uma vez que, o modelo considera nula a precipitação nos dias antecedentes ao instante inicial da simulação. De modo a combater esta limitação, foi imposto considerar os 10 dias antecedentes ao início da mesma. A parametrização de certos parâmetros, nomeadamente o valor do número de escoamento, é determinante para os resultados. A obtenção de bons resultados depende da experiência e sensibilidade do utilizador do modelo, pois é ele que define esses parâmetros em função dos dados hidrometeorológicos registados nos dias anteriores.

Outra limitação identificada na fase de construção do modelo está relacionada com os dados pluviométricos disponíveis no portal público do SNIRH, notando-se a presença de muitas falhas de dados referentes aos anos hidrológicos compreendidos entre 2006-07 e 2014/2015. No entanto, desde 2015/2016, altura em que a rede foi reativada, verifica-se uma significativa melhoria na operacionalidade da rede hidrometeorológica nacional, nomeadamente no que diz respeito à bacia do Tâmega, com maior número de estações disponíveis e com valores aparentemente fiáveis. O facto de o SNIRH apenas disponibilizar os dados referentes ao dia anterior é também uma limitação que terá necessariamente de ser ultrapassada na fase de implementação deste modelo de alerta.

Comparativamente com os sistemas de alerta que a EDP Produção implementou nos seus mais recentes aproveitamentos, este modelo é mais complexo devido à exigência de parametrização e, sobretudo, na necessidade de uma simulação periódica, o que iria implicar um operador destinado a realizar simulações periódicas de 3 horas. Essa condição poderá ser considerada como uma limitação numa fase de implementação do modelo.

Assim, pode-se concluir que, foi possível desenvolver um modelo de alerta de cheias em obra, para o AH Fridão, capaz de antecipar de forma eficaz e fiável a ocorrência de eventos de cheia de modo a proporcionar às entidades responsáveis tempo para agir e, deste modo, garantir a proteção de recursos humanos, materiais e ambientais.

6.2.DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Tendo em conta as presentes limitações, sugerem-se as seguintes medidas para desenvolvimento do sistema de alerta de cheias em obra a implementar durante a construção do AH Fridão:

- Implementação de estações meteorológicas localizadas em Cavez, Celorico de Basto e em Lamas de Alvadia ou estabelecimento de um acordo com a Agência Portuguesa do Ambiente tendo como objetivo a obtenção de dados horários em tempo real das estações pluviométricas acima referidas;

- Automatização do processo de simulação do HEC-HMS, tornando-o capaz de: i) importar os dados das estações meteorológicas (APA) e hidrométricas (EDP Produção); ii) extrapolar os caudais para as 3 horas seguintes ao momento da simulação em função do declive registado na hora anterior; iii) correr o modelo;
- Análise de futuras situações de cheia para validar escolha de estações pluviométricas que caracterizam o modelo meteorológico.

Outro desenvolvimento futuro passaria por estender o modelo até à cidade de Amarante e definir um sistema de alerta adequado, com base nos caudais a partir dos quais a zona ribeirinha da cidade é afetada. O prolongamento deste modelo apenas faria sentido até ao início da construção da barragem do AH Fridão; a partir desse momento o modelo teria de ser substituído por outro baseado no funcionamento do referido aproveitamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APA. (2007). APA: Agência Portuguesa do Ambiente - Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial de Aproveitamento Hidroelétrico.
- APA. (2018). SNIAmb-Sistema Nacional de Informação de Ambiente. Retrieved from <https://sniamb.apambiente.pt/content/geo-visualizador?language=pt-pt>
- Beckers, J. ., Smerdon, B. ., & Wilson, M. . (2009). Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta. *Forrex-Forum for Research and Extension in Natural Resources*.
- Conceição, M. J., Ferreira, A. C., & Silva, J. D. da. (2014). Sistemas de alerta de cheias em obra- Casos dos Aproveitamentos Hidroelétricos do Baixo Sabor e de Foz Tua, (1), 1–15.
- EDP. (2009). Aproveitamento hidroelétrico de fridão-Estudo de Impacte Ambiental, 1.
- EDP. (2011). *Aproveitamento Hidroelétrico de Fridão. Projeto. Volume IV-Estudos específicos. Tomo IV-A1-Estudos Hidrológicos-Águas Superficiais*. EDP-Gestão da Produção de Energia, S.A.
- EDP. (2014). Sistemas de Alerta de Cheias em Obra-Aproveitamentos Hidroelétricos do Baixo Sabor e de Foz Tua.
- EDP. (2018a). EDP: Centrais Hidroelétricas-Torrão: Informação Técnica. Retrieved July 20, 2003, from https://a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/info_tecnica.php?item_id=55&cp_type=§ion_type=info_tecnica
- EDP. (2018b). EDP. Produção Hidroelétrica. Novas Barragens: Fridão. Retrieved from https://a-nossa-energia.edp.pt/centros_produtores/info_tecnica.php?item_id=81&cp_type=§ion_type=info_tecnica
- Fan, F. M. (2015). *Previsão por conjunto de vazões afluentes a reservatórios em grandes bacias hidrográficas brasileiras. Tese de doutoramento em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Brasil*.
- Feldman, A. D. (2000). Hydrologic modeling system HEC-HMS, Technical Reference Manual. *Technical Reference Manual*, (March), 145. <https://doi.org/CDP-74B>
- Ferreira, A. C., Silva, S., & Silva, J. D. da. (2017). *Rede Hidrometeorológica da EDP Produção-Sua Importância na Definição dos Sistemas de Alerta de Cheias nas Obras de Aproveitamentos Hidroelétricos*. Porto.
- Garcia, L. G., & Fransozi, A. A. (2017). Modelagem hidrológica e sua relação com o SIG. *Laboratório de Hidrologia Florestal ESALQ-USP*.
- Gomes, T. (2008). Aplicação De Uma Ferramenta de Modelação Hidrológica em Contínuo na Gestão de Recursos Hídricos em Zonas Urbanas. Relatório de Projecto. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Hipólito, J. R., & Vaz, Á. C. (2011). *Hidrologia e Recursos Hídricos*. (I. Press, Ed.) (1ª Edição).
- I.P., I. da Á., REN, COBA, PROCESL, & DGEG. (2007). Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH). Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Programa+nacional+de+barra>

gens+com+elevado+potencial+hidroel?ctrico+(pnbeeph)#0

- Iberdrola. (2010). Aproveitamentos hidroelétricos de Gouvães, Padroselos, Alto Tâmega e Daivões: Estudo de Impacte Ambiental. Resumo não técnico.
- Iberdrola. (2017). Apresentação do Sistema Electroprodutor do Tâmega.
- IPMA. (2018a). Instituto Português do Mar e da Atmosfera: Enciclopédia ipma.pt. Retrieved February 5, 2018, from <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/index.html>
- IPMA. (2018b). Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Área educativa: Clima de Portugal Continental. Retrieved February 3, 2018, from <https://www.ipma.pt/pt/educativa/tempo.clima/>
- Jimenez, P. (2016). *Sistema de Alerta a Cheias com Ênfase na Previsão de Vazões*. Universidade Federal do Paraná.
- Lencastre, A., Franco, F. M. (2010). *Lições de Hidrologia* (3ª Edição). Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.
- Lighthill, M. J., & Whitham, G. B. (1955). *On Kinematic Waves: I. Flood movement in long rivers*. Proceedings, Royal Society, London, Series A, Vol. 229.
- MacArthur, R., & DeVries, J. J. (1993). Introduction and Application of Kinematic Wave Routing Techniques Using HEC-1. *U.S. Army Corps of Engineers*, (July), 1–5.
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill Education, Inc., USA.
- Mendes, J. (2017). *Previsão e alerta de cheias em bacias regularizadas-aplicação ao caso de uma bacia portuguesa. Tese de Doutoramento*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Miller, J. E. (1984). *Basic Concepts of Kinematic-Wave Models*. U.S Geological Suvey Professional Paper 1302.
- Neto, J., Ribeiro-Neto, A., & Montenegro, S. (2014). Assessment of Rainfall-Runoff Models for Flood River Extreme Event Simulations. *Proceedings of the 6th International Conference on Flood Management (ICFM6)*, 1–10.
- Parker, D. J. (2017). Flood Warning Systems and Their Performance. In *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science* (Vol. 1, pp. 1–34). <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.84>
- Ponce, V. M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practices*. Prentice Hall.
- Portela, M. M. (2006). *Modelação hidrológica*. Instituto Superior Técnico.
- Quintela, A., & Portela, M. (2002). A Modelação Hidrológica em Portugal nos Últimos 25 Anos do Século XX, nas Perspectivas Determinística, Probabilística e Estocástica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 7(4), 51–64. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v7n4.p51-64>
- Rennó, C. D., & Soares, J. V. (2000). *Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental. Relatório Técnico Parcial. Programa de Ciência e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas Ação "Métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental"*.
- Saramago, M. (2017). Redes de Monitorização Hidrometeorológicas. *Revista Recursos Hídricos*, 38(1), 33–39. <https://doi.org/10.5894/rh38n1-d4>

- Silva Souza, A., De Lima Curvello, A. M., De Souza, F. L. D. S., & Da Silva, H. J. (2017). A flood warning system to critical region. *Procedia Computer Science*, 109(2016), 1104–1109. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.05.453>
- Singh, V. P. (2001). *Kinematic wave modelling in water resources: a historical perspective*. Hydrological Processes, John Wiley & Son.
- SNIRH. (2018). Sistema Nacional de Informação de Recursos Hidrográficos. Retrieved July 20, 2003, from <https://snirh.apambiente.pt/index.php?idMain=4&idItem=2>
- WMO. (2011). *Manual on flood forecasting and warning*. ISBN 978-92-63-11072-5. Chairperson, Publications Board.

ANEXOS

ANEXO A: HIDROGRAMAS DE CHEIA

Este anexo destina-se à apresentação dos hidrogramas registados nas EH de Ponte Cavez e de Fridão para os anos hidrológicos compreendidos entre 2008/2009 e 2016/2017.

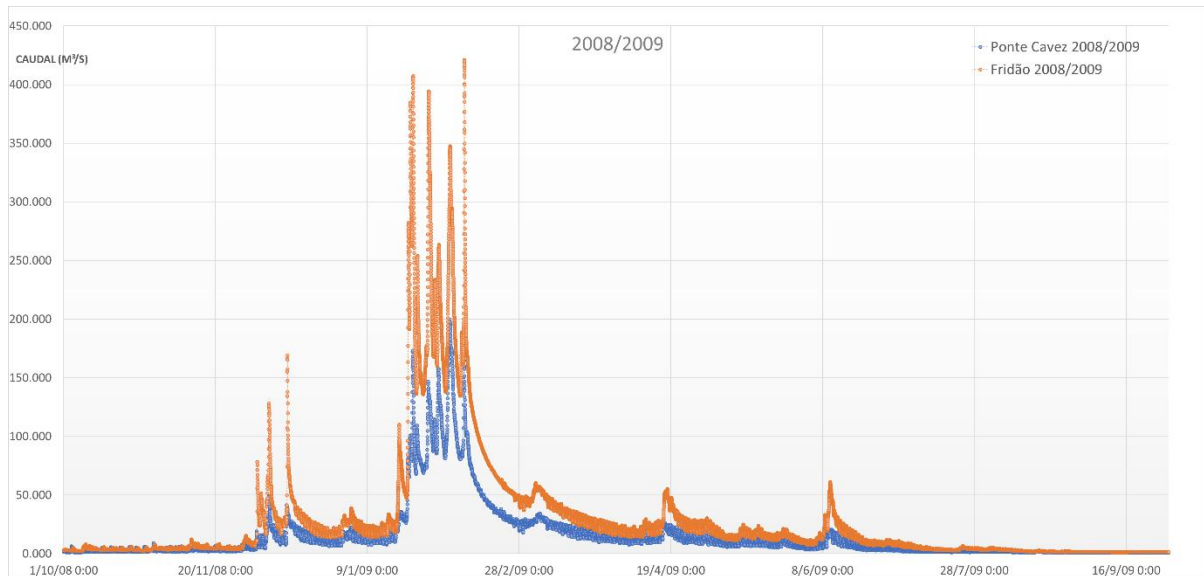


Figura A.1 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2008/2009

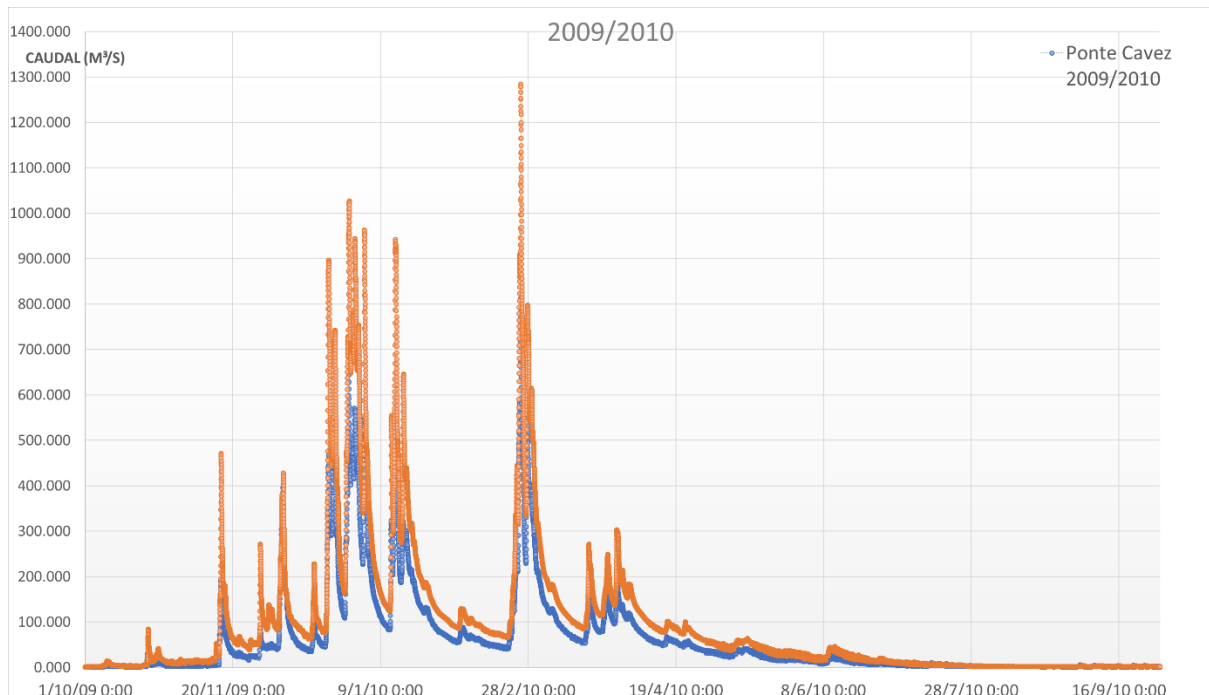


Figura A.2 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2009/2010

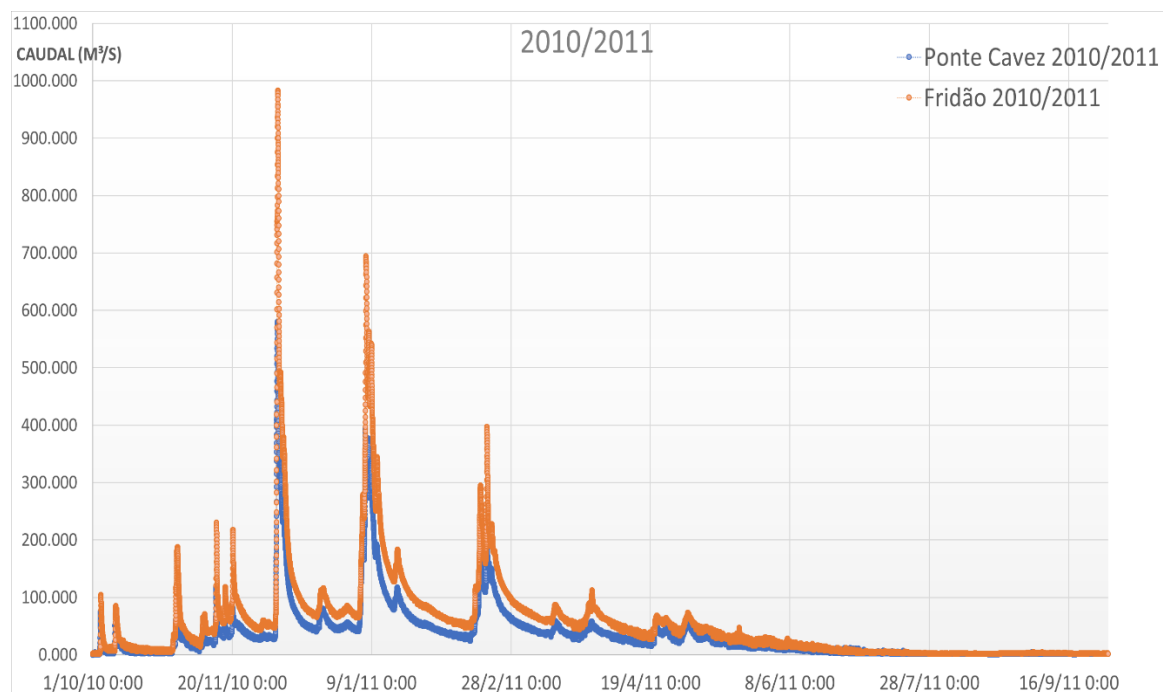


Figura A.3 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2010/2011

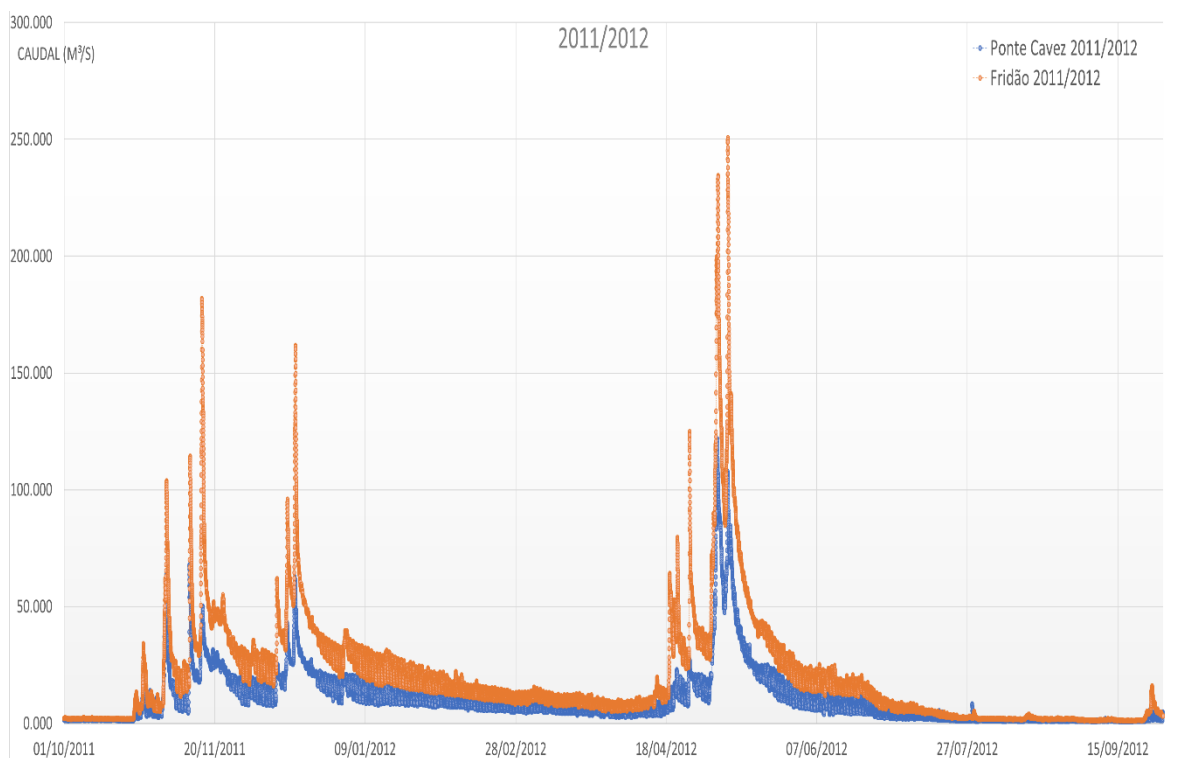


Figura A.4 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2011/2012

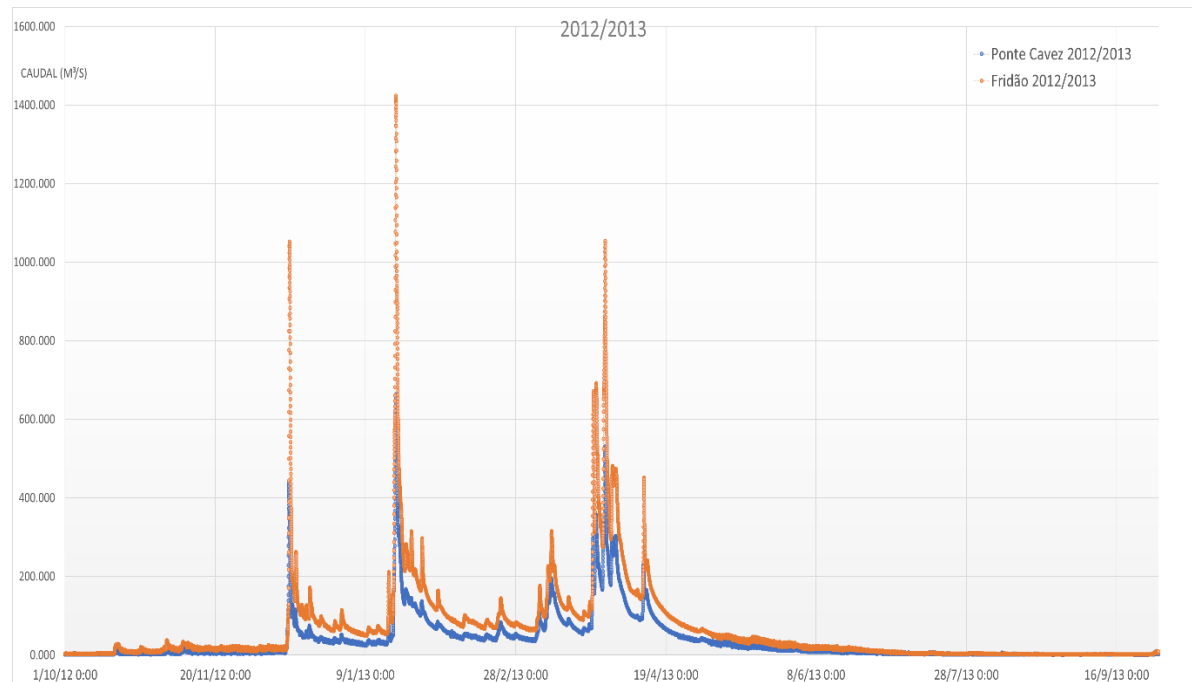


Figura A.5 - Hidrograma registrado para o ano hidrológico 2012/2013

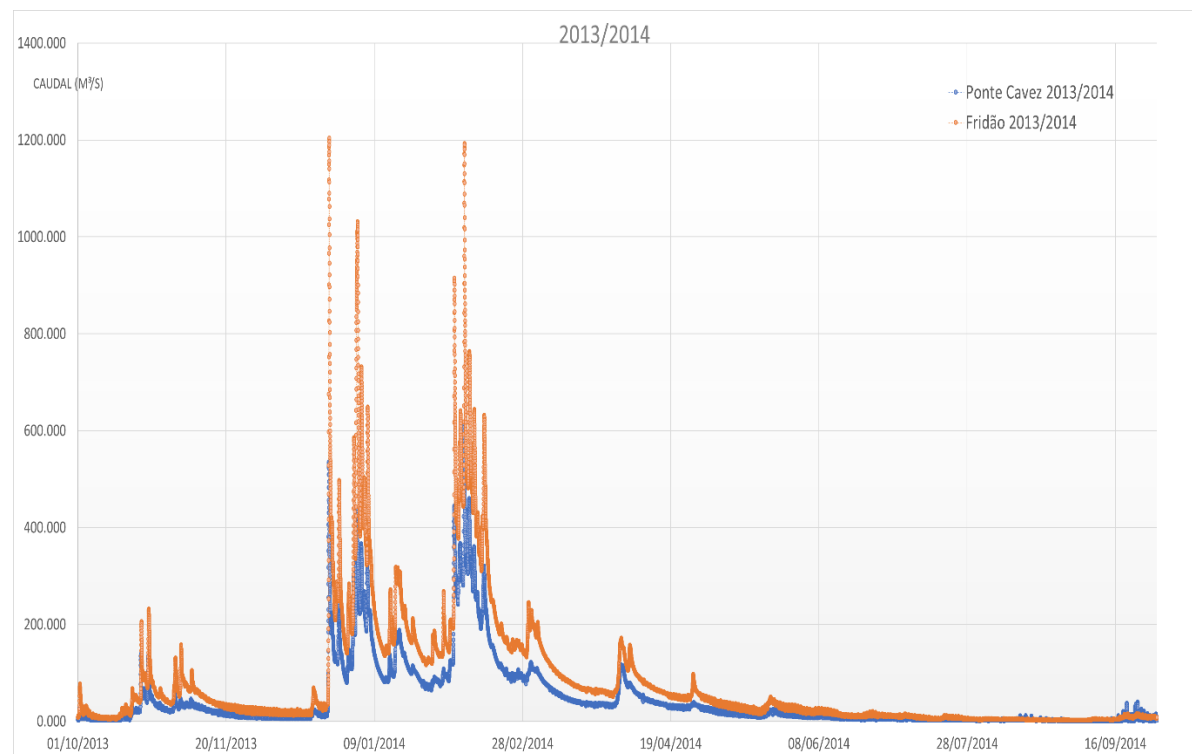


Figura A.6 - Hidrograma registrado para o ano hidrológico 2013/2014

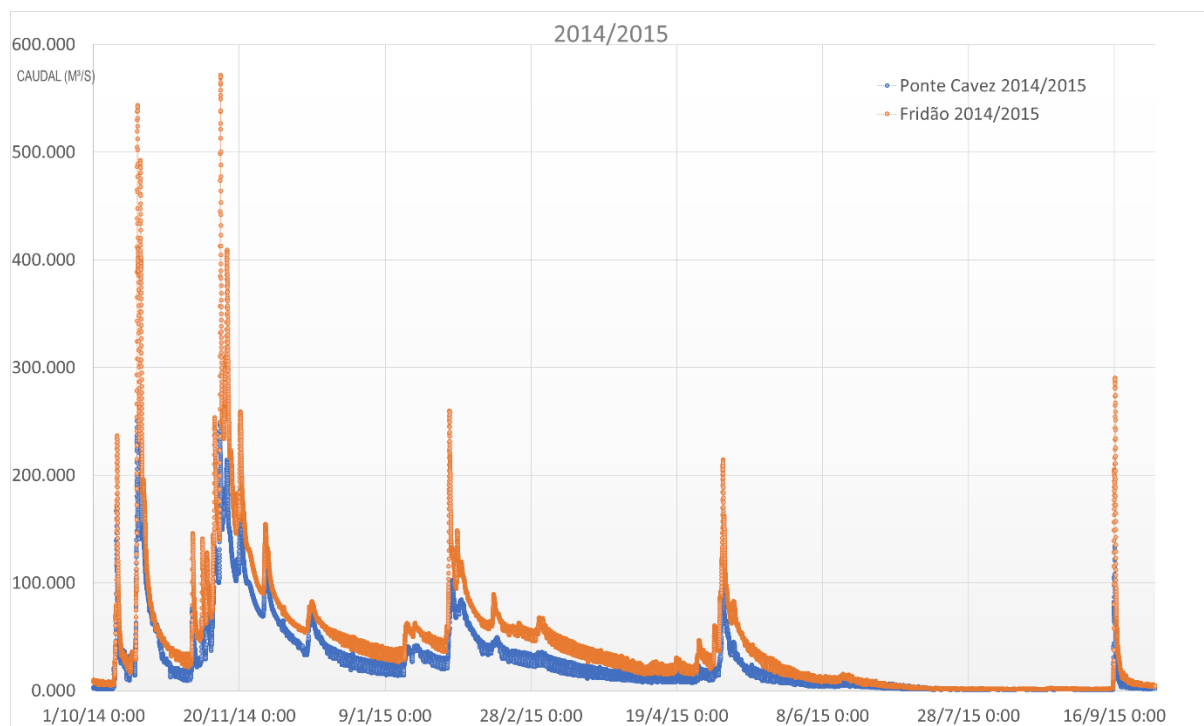


Figura A.7 - Hidrograma registrado para o ano hidrológico 2014/2015

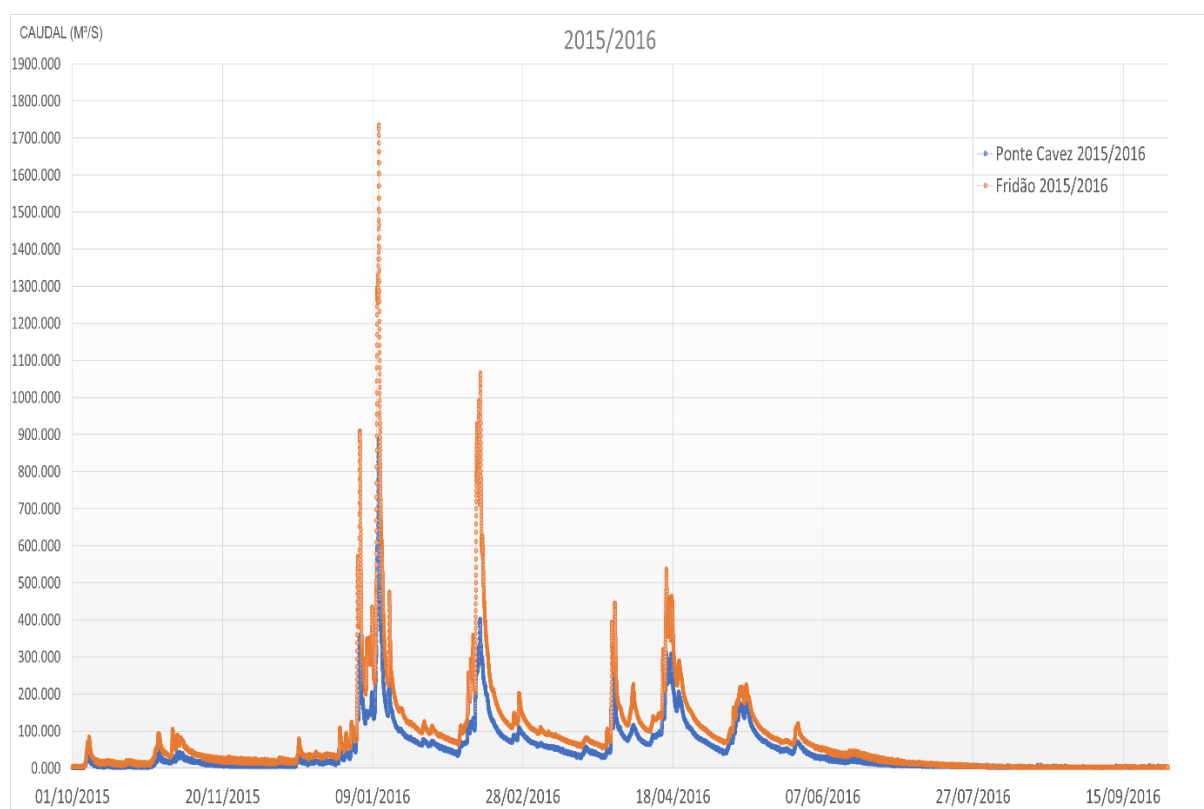


Figura A.8 - Hidrograma registrado para o ano hidrológico 2015/2016

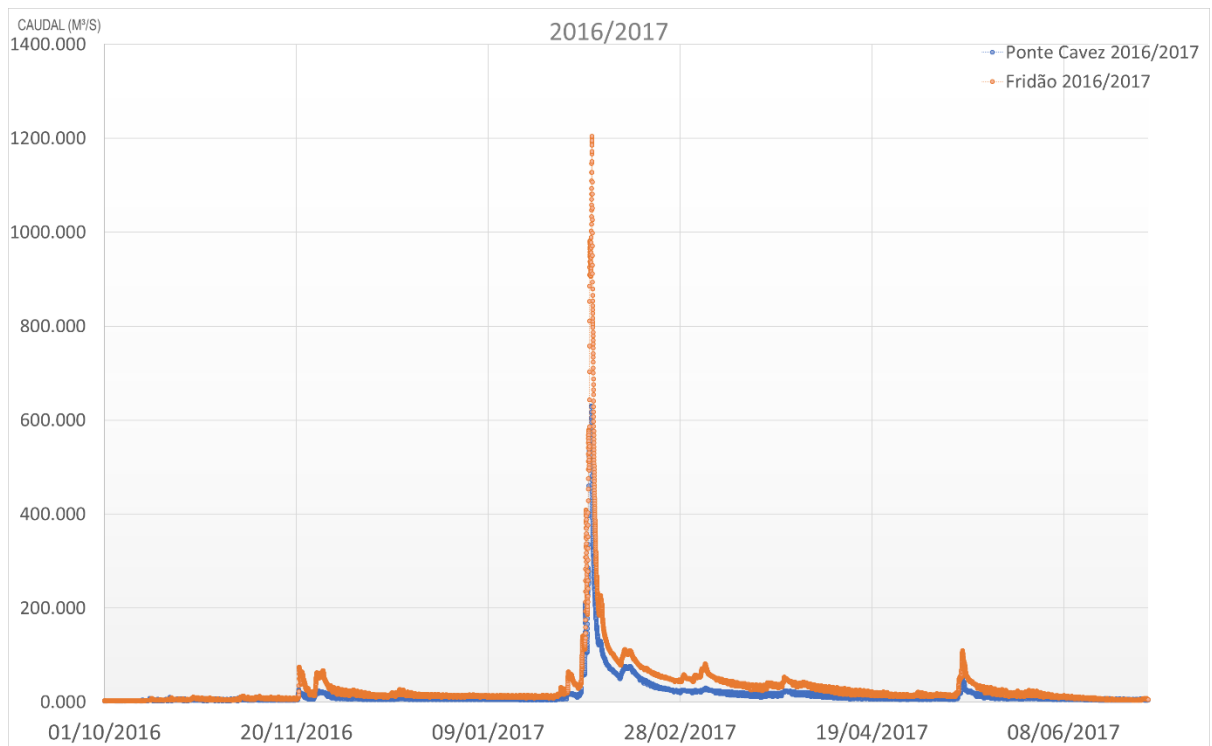


Figura A.9 - Hidrograma registado para o ano hidrológico 2016/2017

ANEXO B: DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS A UTILIZAR NA MODELAÇÃO HIDROLÓGICA**B.1: MÉTODO DO NÚMERO DE ESCOAMENTO DO SCS**

O Método do Número de Escoamento do SCS permite calcular o volume total de escoamento gerado através da precipitação.

Para um dado evento de pluviosidade intensa, a razão entre a altura de precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial e a capacidade máxima de retenção de água na bacia é igual à razão entre a precipitação efetiva e o escoamento superficial potencial (Ponce, 1989).

A precipitação efetiva é determinada em função da precipitação acumulada, das características do terreno e da humidade do solo, através da equação B.1.

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \rightarrow P > I_a \quad (\text{B.1})$$

Em que:

- P_e é a precipitação efetiva no instante t ;
- P é precipitação total acumulada no instante t ;
- I_a é a retenção inicial, ou seja, a perda de precipitação inicial;
- S a retenção potencial máxima, que corresponde à capacidade da sub-bacia em reter água.
- $P - I_a$ é o escoamento superficial potencial;

A equação B.1 só pode ser aplicada quando o valor da precipitação total acumulada sobre a bacia exceder o valor da retenção inicial. Até ao momento em que a precipitação acumulada não supera a retenção inicial, a precipitação efetiva, e por consequência o escoamento direto, será igual a zero.

$$P_e = 0 \rightarrow P \leq I_a \quad (\text{B.2})$$

A retenção inicial pode por sua vez ser estimada pela relação empírica proposta pelo SCS:

$$I_a = 0,2 S \quad (\text{B.3})$$

O parâmetro S (retenção potencial máxima), está relacionada com o tipo de solo e com as suas condições de utilização e de cobertura na bacia hidrográfica por meio do número de escoamento, CN (curve number), podendo ser expresso da seguinte forma:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \text{ (unidades SI)} \quad (\text{B.4})$$

O parâmetro CN depende das características da superfície do terreno, particularmente das condições existentes de humidade do solo e relaciona-se com as perdas de água que ocorrem quando se gera escoamento resultante da precipitação. Os valores mais baixos de CN correspondem a situações em que os solos estão poucos saturados e existe uma capacidade maior de retenção, ou seja, perdas de precipitação mais elevadas. Nestes casos, como ocorre maior retenção é gerado menos escoamento direto. Por outro lado, os valores mais elevados de CN correspondem a situações em que o grau de

saturação é mais elevado e, conseqüentemente, uma menor capacidade de infiltração de água. Nestes casos as perdas de precipitação são menores e gera-se mais escoamento direto.

Os valores de CN podem variar desde cerca de 30, em solos com elevada permeabilidade e elevadas taxas de infiltração, até 100, em superfícies impermeáveis ou em massas de água (Feldman, 2000; Lencastre, A., Franco, 2010).

Do ponto de vista hidrológico, distinguem-se os seguintes grupos de solos (Lencastre, A., Franco, 2010):

Grupo A: solos dando origem a baixo escoamento superficial potencial e elevada infiltração, mesmo quando totalmente encharcados. Inclui os solos arenosos profundos com pouco silte e argila.

Grupo B: solos que apresentam taxas de infiltração moderadas quando totalmente encharcados. Incluem maioritariamente solos medianamente drenados.

Grupo C: solos com baixas taxas de infiltração quando totalmente encharcados consistindo principalmente em solos em que existem camadas que impedem o movimento descendente da água e em solos com textura moderadamente fina a fina, com percentagem elevada de argila.

Grupo D: solos com elevado escoamento superficial potencial. Apresentam, quando totalmente encharcados, taxas de infiltração muito reduzidas e são fundamentalmente constituídos por solos argilosos, solos em zonas em que o nível freático é constantemente elevado, solos em que, à superfície ou próximo desta, ocorrem camadas argilosas ou ainda a solos finos sobre camadas impermeáveis.

No quadro seguinte é apresentado valores de referência do número de escoamento, CN, para diferentes utilizações e tipo hidrológicos do solo e para um estado de humidade anterior médio (AMC-II).

Quadro B.1- Valores de referência do parâmetro CN, segundo o SCS, considerando um estado de humidade anterior médio (AMC-II) (extraído de (Mendes, 2017))

Utilização ou cobertura do solo	Tipo hidrológico do solo*			
	A	B	C	D
Terras lavradas				
não cultivadas	72	81	88	91
cultivadas	62	71	78	81
Pastagens				
pobres	68	79	86	89
boas	39	61	74	80
Prados em boas condições	30	58	71	78
Florestas				
pouco densas	45	66	77	83
densas	25	55	70	77
Espaços abertos relvados, campos de golf, cemitérios, etc.:				
em boas condições (cobertura com 75% ou mais de relva)	39	61	74	80
em fracas condições (cobertura com 50% a 75% de relva)	49	69	79	84
Áreas comerciais (85% de impermeabilização)	89	92	94	95
Zonas industriais 72% de impermeabilização)	81	88	91	93
Áreas residenciais, com impermeabilização média de:				
65%	77	85	90	92
38%	61	75	83	87
30%	57	72	81	86
25%	54	70	80	85
20%	51	68	79	84
Parques pavimentados, telhados, passeios, etc.	98	98	98	98
Ruas e estradas:				
pavimentadas com sarjetas e coletores	98	98	98	98
empedradas	76	85	89	91
em terra batida	72	82	87	89

No quadro B.2 é apresentado a relação dos números de escoamento com os diferentes estados de humidade do solo, sendo: AMC-I a situação seca, AMC-II a situação média e AMC-III a situação húmida (Lencastre, A., Franco, 2010; Mendes, 2017).

Quadro B.2- Correspondência dos números de escoamento para os diferentes estados de humidade do solo, extraído de (Mendes, 2017).

Estado de humidade do solo	Número de escoamento, CN														
AMC -I	100	87	78	70	63	57	51	45	40	35	31	26	22	18	15
AMC -II	100	95	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
AMC -III	100	98	96	94	91	88	85	82	78	74	70	65	60	55	50

B.2: MÉTODO DA ONDA CINEMÁTICA

A teoria da onda cinemática desenvolvida por (Lighthill & Whitham, 1955) encontrou na hidrologia um vasto campo de aplicação, tendo sido aplicada não só à modelação de escoamento direto, como é o caso, mas também à movimentação de água em solos, escoamento em macroporos, problemas de erosão e transporte sedimentos, transporte de solutos, sedimentação, entre outros.

Antes de caracterizar o modelo da onda cinemática em termos matemáticos, irá ser abordado de uma forma geral os conceitos básicos da cinemática, incluindo uma comparação com a dinâmica.

A cinemática é definida como o estudo do movimento, excluindo as influências da massa e força. E, contraste com a Dinâmica, onde estas influências são incluídas. Nesse sentido, as ondas de cheia podem ser caracterizadas como dois fenómenos de onda; a onda cinemática e onda dinâmica. Segundo (MacArthur & DeVries, 1993; Singh, 2001), apesar dos dois tipos de onda estarem presentes num instante inicial, com o decorrer de um evento de cheia, as características das bacias hidrográficas levam a que, por norma, as ondas cinemáticas sejam dominantes.

Quando a pressão e a inércia são relevantes, o movimento é governado por ondas dinâmicas. Quando estas duas forças não são relevantes para o movimento da onda, o escoamento é dominado por ondas cinemáticas. Esta última condição de escoamento, em que a componente do peso (força exercida na direção do eixo do canal devido ao peso do fluido escoando para jusante em resultado da ação da gravidade) é aproximadamente equiparada pelas forças de resistência devido à fricção do leito, é geralmente expressa pela equação de Manning (Equação B.5):

$$Q = k * R^{\frac{2}{3}} * S_0^{\frac{1}{2}} * A \quad (B.5)$$

Onde:

Q = valor do escoamento (m^3/s)

$k = 1/n$, em que n é o coeficiente de rugosidade de Manning (m^{-3}/s)

R = raio hidráulico (m)

S = declive da superfície (m/m)

A = área da secção (m^2)

O facto de escoamentos predominantemente cinemáticos não sofrerem mudanças de aceleração significativas, permanecendo dessa maneira uniformes, torna difícil a perceção de formação de uma onda para um observador no momento da passagem da onda de cheia. Os escoamentos cinemáticos são, por norma, classificados como gradualmente variados, ou seja, o vetor velocidade varia, para uma secção em estudo, no tempo e no espaço de forma gradual. Por outro lado, as ondas dinâmicas atingem valores maiores de velocidade a atenuam-se mais rapidamente. A figura B.1 representa uma comparação entre a formação de uma onda dinâmica e de uma onda cinemática (MacArthur & DeVries, 1993)

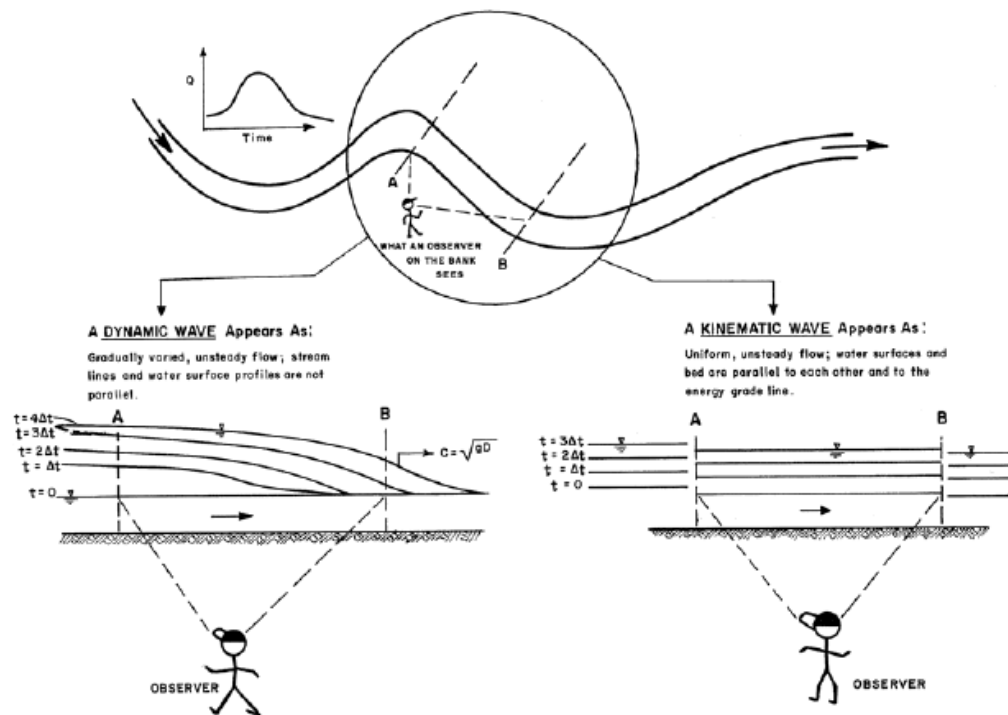


Figura B.10 - Comparação entre onda dinâmica e onda cinemática extraído de (MacArthur & DeVries, 1993).

Dada uma bacia hidrográfica de natureza complexa, para simular a sua resposta à ocorrência de eventos de precipitação intensos, é aplicado um modelo matemático composto tendo por base um conjunto de elementos simples. Estes elementos simples são constituídos, geralmente, pelos planos onde se processa o escoamento sobre o terreno, os pequenos coletores onde se vai processando a entrada lateral e uniforme da água escoada sobre o terreno e o canal principal. A figura seguinte representa uma combinação dos elementos referidos (MacArthur & DeVries, 1993).

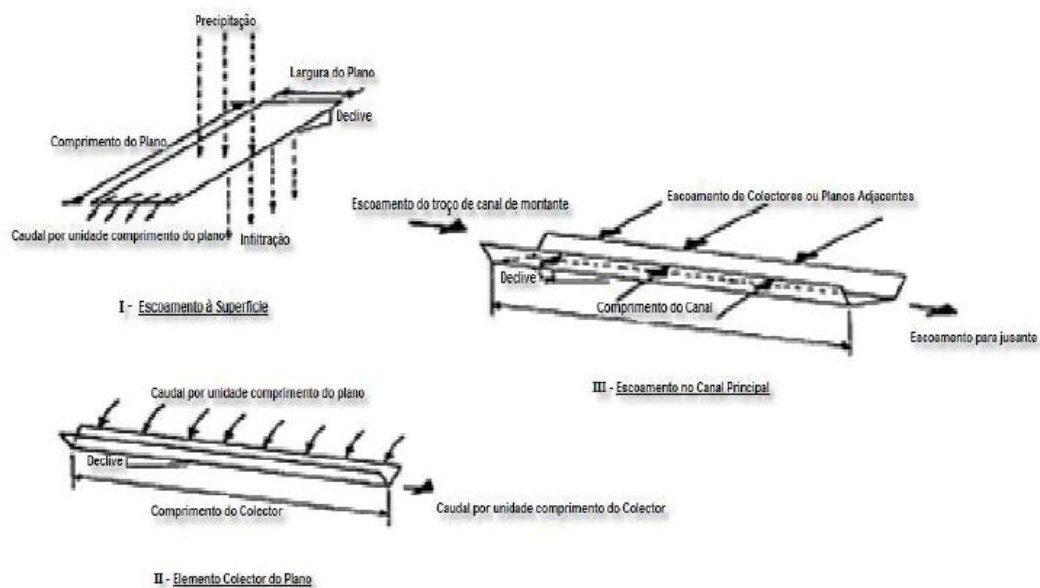


Figura B.11- Elementos usados no processo de cálculo do modelo da onda cinemática extraído de (Gomes, 2008)

De modo a aplicar com sucesso esta abordagem é necessário descrever o escoamento sobre os referidos elementos planares idealizados, definindo algumas condições fronteiras impostas pelo modelador. Estas condições fronteiras estão relacionadas com as condições em que se processa o escoamento. Repetindo o processo para os restantes elementos (colectores e canal principal), torna-se possível estabelecer a combinação entre os elementos que constituem a bacia e desse modo obter a sua resposta face a um evento pluvioso. A figura seguinte resume a relação entre os três diferentes tipos de elementos (MacArthur & DeVries, 1993).

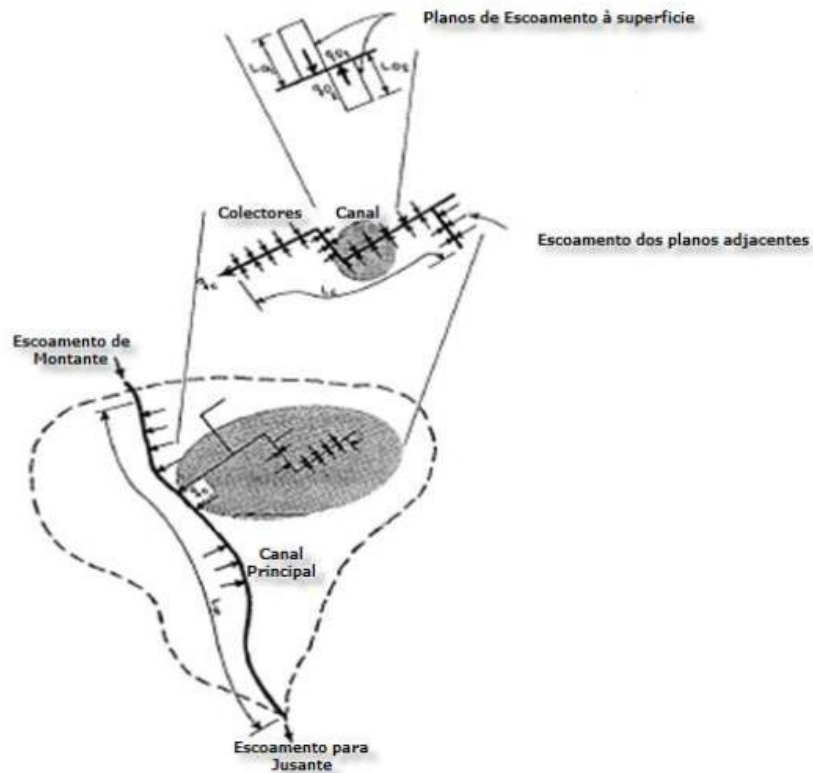


Figura B.12- Relação entre os elementos representativos do escoamento numa bacia hidrográfica de acordo com o modelo da onda cinemática extraído de (Gomes, 2008).

(MacArthur & DeVries, 1993) sugere que o escoamento superficial seja calculado separadamente do escoamento em canal devido à dimensão do nível de água ser inferior no primeiro caso. Deste modo, a forma das equações do movimento da água à superfície livre difere da forma aplicada ao movimento em canal. Os valores de escoamento são calculados individualmente e depois combinados de modo a preservar a continuidade do escoamento entre eles.

Em 1870 St Venant desenvolveu equações diferenciais derivadas dos princípios básicos da conservação de massa e momento. Essas equações representam, em termos matemáticos, a mecânica do escoamento em regime variável e em canal aberto.

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = q_l + I_{pe} \quad (\text{B.6})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u * \frac{\partial u}{\partial x} + g * \frac{\partial u}{\partial x} = g * (S_0 - S_t) - q_l * \frac{(u - v)}{y} \quad (\text{B.7})$$

Em que:

- g = aceleração da gravidade (ms^2);
- y = altura do escoamento (m);
- q = caudal por unidade comprimento de canal ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$);
- x = distância medida na direção de jusante (m);
- t = tempo (s);
- u = componente do eixo dos xx do vetor velocidade média;
- I_{pe} = intensidade da precipitação efetiva ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$);
- S_o = declive do leito (m/m);
- S_f = atrito, como definido pela equação de Manning;
- q_l = caudal lateral por unidade de comprimento de canal, relativo à área drenante ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$);
- v = componente do eixo dos xx do vetor velocidade média do escoamento lateral (valor geralmente desprezável);

Visto que, as ondas cinemáticas ocorrem quando os termos dinâmicos da equação do momento se tornam desprezáveis, é então válido assumir que o declive do leito iguala o atrito do mesmo. Para estas condições, a descarga pode ser caracterizada como função da altura do escoamento. Desse modo, simplificando a equação do momento de St. Venant obtém-se a equação geral do modelo da onda cinemática:

$$Q = \alpha * Y^m \quad (\text{B.8})$$

Em que Q representa a descarga em m^3/s , α e m são parâmetros característicos do modelo, estando diretamente relacionados com as características da bacia e do escoamento. Esta equação representa uma descrição simplificada do sistema físico em termos de superfícies e canais com propriedades homogêneas.

De seguida, será apresentado as equações que servem de cálculo ao escoamento do plano e o escoamento em coletores e canais.

Dada a reduzida altura do escoamento e a elevada extensão dos planos (elevada área) é possível assumir que o raio hidráulico e a secção, R e A , $(y_0 x l)/l$ e $y_0 x l$, aplicando a equação de Manning (3.1) resulta a equação 3.5:

$$q_0 = \left(\frac{1.486}{N} \cdot S_o \right) \cdot y_0^{5/3} \quad (\text{B.9})$$

Em que:

- q_0 = escoamento do plano (m^3/s);
- N = rugosidade do plano;
- y_0 = altura média do escoamento (m);
- S_o = declive da superfície (m/m);

Esta equação constitui uma reformulação da equação geral da onda cinemática para o escoamento sobre a superfície (Equação 3.6) sendo $\alpha_0 = (1.486/N) S_o^{1/2}$ e $m_0 = 5/3$.

$$q_0 = \alpha_0 \cdot y_0^{m_0} \quad (\text{B.10})$$

Uma vez que permanecem duas incógnitas nesta equação, é necessário a introdução de uma vertente da equação da continuidade (Equação 3.3) que permita estabelecer uma relação com a precipitação efetiva, sendo esse valor conhecido. Desse modo:

$$\frac{\partial y_0}{\partial t} + \frac{\partial q_0}{\partial x} = I_{pe} \quad (\text{B.11})$$

Onde:

q_0 - escoamento do plano por unidade de comprimento deste ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$);
 y_0 - profundidade média do escoamento no plano (m);
 I_{pe} = intensidade da precipitação efetiva ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$);
 x = comprimento da superfície em estudo (m);
 t = tempo (s).

As equações da onda cinemática que determinam o escoamento em coletores em canais são:

$$\frac{\partial A_c}{\partial t} + \frac{\partial Q_c}{\partial x} = q_0 \quad (\text{B.12})$$

$$Q_c = \alpha_c \cdot A_c^{m_c} \quad (\text{B.13})$$

Em que:

A_c - área da secção em estudo (m^2);
 Q_c - descarga (incluindo a que possa advir de montante) (m^3/s);
 q_0 - escoamento lateral proveniente dos planos adjacentes por unidade de comprimento do canal ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$);
 t - tempo (s);
 x - distância ao longo do talvegue (m);
 α_c, m_c - parâmetros da onda cinemática para uma determinada forma de secção transversal, declive e rugosidade.

O sistema de equações 3.6 e 3.7 constitui a formulação do modelo da onda cinemática para o escoamento à superfície do terreno. Tendo por base uma precipitação útil, para um dado ponto no espaço e num dado instante é possível conhecer o a profundidade média do escoamento no plano, y_0 . Substituindo esse valor na Equação 3.5 obtém-se o valor da descarga, q_0 , do respetivo plano (MacArthur & DeVries, 1993).

Relativamente ao sistema de coletores e linha de água, o uso de formas trapezoidais ou circulares depende das características da rede de canais constituintes da bacia hidrográfica. O método da onda cinemática considera cada sub-bacia como um sistema constituído por duas componentes fundamentais: superfícies de escoamento e canais coletores. As superfícies de escoamento são assimiladas a canais planos definidos pelo comprimento, inclinação e coeficiente de rugosidade, enquanto os canais coletores são caracterizados pelo comprimento, secção transversal, inclinação e coeficiente de rugosidade (EDP, 2011).

B.3: MÉTODO DE MUSKINGUM-CUNGE

O modelo de Muskingum é utilizado para simular o escoamento ao longo das linhas de água. Este método considera que o armazenamento no trecho de canal resulta da soma de dois armazenamentos, um prismático e outro em cunha (Figura 3.14), recorrendo à equação da continuidade expressa sob a forma da equação de armazenamento:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = I - O \Leftrightarrow \partial S = I \partial t - O \partial t \quad (\text{B.14})$$

Em que t representa o tempo em segundos; I corresponde ao caudal afluente (m^3/s); O é o caudal efluente (m^3/s) e S o volume de armazenamento (m^3).



Figura B.4 - Armazenamento prismático e em cunha. Modelo de Muskingum extraído de (Portela, 2006)

De acordo com (Portela, 2006), o armazenamento prismático corresponde à configuração da superfície livre numa situação de regime permanente e o armazenamento em cunha ao volume armazenado entre configuração anterior e a configuração da superfície livre durante a ocorrência do evento de cheia. Na fase em que se verifica um aumento das cotas da superfície livre por aumento do caudal de cheia, o armazenamento em cunha é positivo, adicionando-se ao armazenamento prismático, e na fase em que as cotas da superfície livre começam a diminuir após a passagem do caudal de ponta de cheia, o armazenamento em cunha é negativo, subtraindo-se ao armazenamento prismático.

O armazenamento prismático é obtido pelo produto do caudal afluente pelo tempo de percurso no trecho, k . O armazenamento em cunha é obtido através de uma diferença ponderada entre os caudais afluentes na secção de montante do trecho e efluente na secção de jusante, diferença essa que é multiplicada pelo tempo de percurso no trecho, ou seja,

$$S = kO + Kx \cdot (I - O) = k \cdot [xI + (1 - x) \cdot O] \quad (\text{B.15})$$

Sendo x , o fator de ponderação. O fator de ponderação, x , caracteriza o efeito do amortecimento da onda enquanto esta propaga-se no trecho de canal. Esse amortecimento traduz a redução do caudal de ponta do hidrograma de saída, efluente, na secção mais a jusante do trecho relativamente ao caudal de ponta do hidrograma afluente na secção mais a montante. O fator de ponderação depende das condições do controlo do escoamento. Por exemplo, se o armazenamento no trecho de canal for essencialmente controlado por condições de jusante, dependendo, assim, do caudal efluente, o fator de ponderação é nulo, ou seja, $x=0$. Nestas condições, $S=kO$, relação que define um reservatório linear. Se os caudais

afluentes e efluentes tem igual peso, o fator de ponderação é igual a 0,5. Neste caso a onda de cheia propaga-se sem atenuação, ou seja, a onda sofre uma translação (Portela, 2006).

Conforme referido no início deste subcapítulo, o modelo de Muskingum contém parâmetros que são unicamente estimáveis por calibração. O modelo de Muskingum-Cunge surge como uma extensão do modelo anterior.

A sua funcionalidade continua a ser a mesma que o modelo anterior, simular o escoamento ao longo das linhas de água e o hidrograma efluente de um troço fluvial é obtido através da seguinte equação:

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_0 Q_j^{n+1} + C_1 Q_j^n + C_2 Q_{j+1}^n \quad (\text{B.16})$$

Em que Q é o caudal na secção j , ou $j+1$, no instante n ou $n+1$, e os coeficientes C são dados por:

$$C_0 = \frac{\Delta t/K - 2x}{2 \cdot (1 - x) + \Delta t/K} \quad (\text{B.17})$$

$$C_1 = \frac{\Delta t/K - 2x}{2 \cdot (1 - x) + \Delta t/K} \quad (\text{B.18})$$

$$C_2 = \frac{\Delta t/K - 2x}{2 \cdot (1 - x) + \Delta t/K} \quad (\text{B.19})$$

Sendo:

$$k = \frac{\Delta x}{c} \quad (\text{B.20})$$

e:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{q_0}{ic\Delta x} \right) \quad (\text{B.21})$$

Em que q_0 é um caudal de referência por unidade de largura, c , a celeridade da onda cinemática e i , o declive do fundo do canal; k , representa o tempo que a onda de cheia demora a percorrer um troço com comprimento Δx propagando-se com a celeridade c . A celeridade da onda cinemática é calculada do seguinte modo:

$$c = \frac{dQ}{dA} \quad (\text{B.22})$$

Em que Q é o caudal de referência e A a área do escoamento.

ANEXO C: ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS

Quadro C.1- Estações localizadas dentro da bacia do rio Tâmega, adaptado de (SNIRH, 2018)

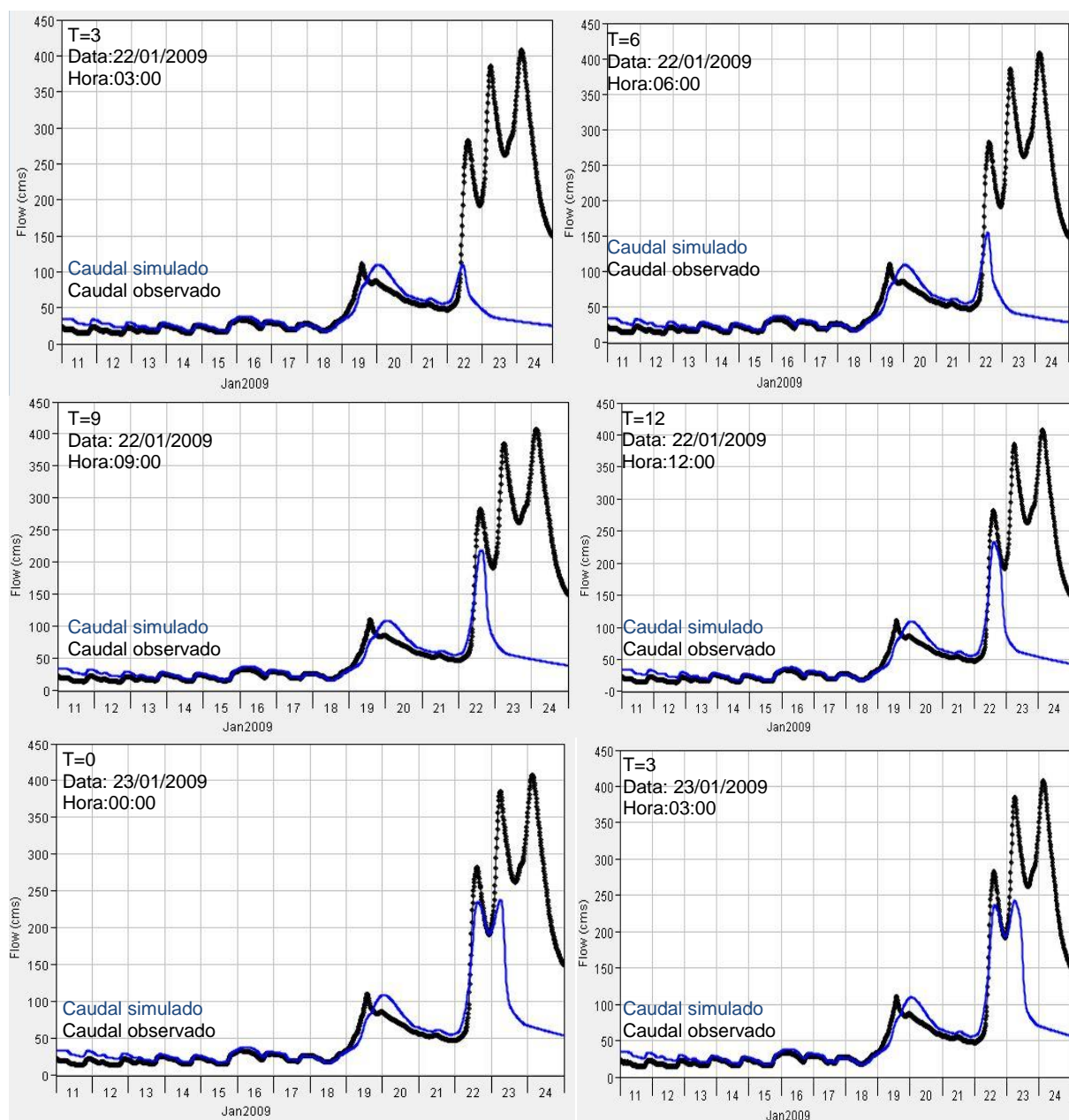
ESTAÇÕES	Estado	Tipo de estação (automática)	Tipo de estação (convencional)	Data de encerramento	Parâmetro	Data início	Data final
ALTURAS DO BARROSO	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	08/06/2006	28/09/2016
AMARANTE	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	14/03/2006	08/01/2018
ARJUIZ	Extinta	Udográfica	-	01/12/1995	-	-	-
BARRACAO	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	21/03/2003	11/08/2016
BOTICAS	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	22/03/2006	12/08/2016
CABEZEIRAS DE BASTO	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	13/02/2007	29/12/2009
CANDEMIL	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	10/05/2006	22/06/2017
CANIÇO	Extinta	-	-				
CARVALHO	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	10/05/2006	17/07/2017
CAVEZ	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	11/05/2006	21/06/2017
CELORICO DE BASTO	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	10/05/2006	22/06/2017
CERVOS	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	21/04/2003	11/08/2016
CHAVES	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	13/05/2003	11/08/2016
COUTO DE DORNELAS	Desativada	Udográfica	Udométrica	29/12/2009	Precipitação horária	16/05/2003	29/12/2009
ENTRE OS RIOS	Ativa	-	Udométrica		Precipitação horária	15/03/2006	13/01/2016
ERMELO	Extinta	-	Udométrica	30/12/1960	-	-	-
FIRVIDAS	Ativa	-	Udométrica	01/09/1986	Precipitação horária	15/05/2003	11/08/2016
GONDIAES	Extinta	-	Udométrica	01/09/1986	-	-	-
GOUVAES DA SERRA	Extinta	-	Udométrica	30/09/1985	-	-	-
LAMAS DE ALVADIA	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	22/11/2005	21/06/2017
LAMAS DE OLO	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	21/04/2003	22/06/2017
LIXA DO ALVAO	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	22/04/2003	07/03/2018
MARCO DE CANAVEZES	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	09/05/2006	17/08/2016
MONDIM DE BASTO	Extinta	-	Udométrica	30/09/1985	-	-	-
PADRELA	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	21/04/2003	10/08/2016
PARADANÇA	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	10/05/2006	19/10/2016
RIBEIRA DA PENA	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	11/05/2006	07/09/2016
SANTA MARTA DA MONTANHA	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	09/04/2003	27/02/2018
SOUTELINHO DA RAIA	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	23/03/2006	11/08/2016
SOUTELO (CHAVES)	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	18/03/2003	12/08/2016
VIDAGO	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	23/03/2006	11/08/2016
VILAR DO PORRO	Ativa	Udográfica	Udométrica		Precipitação horária	18/03/2003	12/08/2016

ANEXO D: SIMULAÇÕES OBTIDAS NA DEFINIÇÃO DO MODELO

Neste anexo estão ilustradas as restantes simulações obtidas na definição do modelo de alerta de cheias.

D.1: SITUAÇÃO 1- 11/01 A 11/02 DO ANO HIDROLÓGICO 2008/2009

i. 11/01 a 24/01 do ano hidrológico 2008/2009



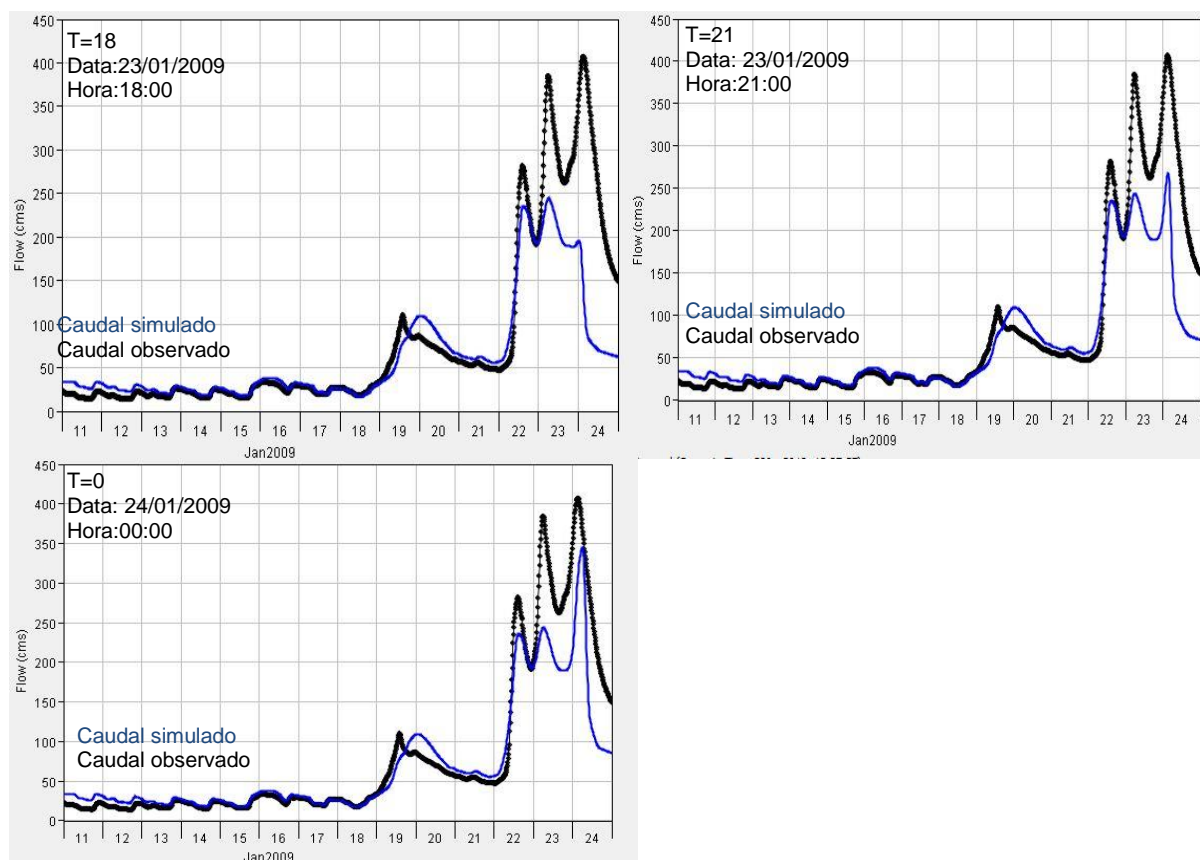


Figura D.13- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 11/01/2009 e 24/01/2009

ii. 19/01 a 02/01 do ano hidrológico 2008/2009

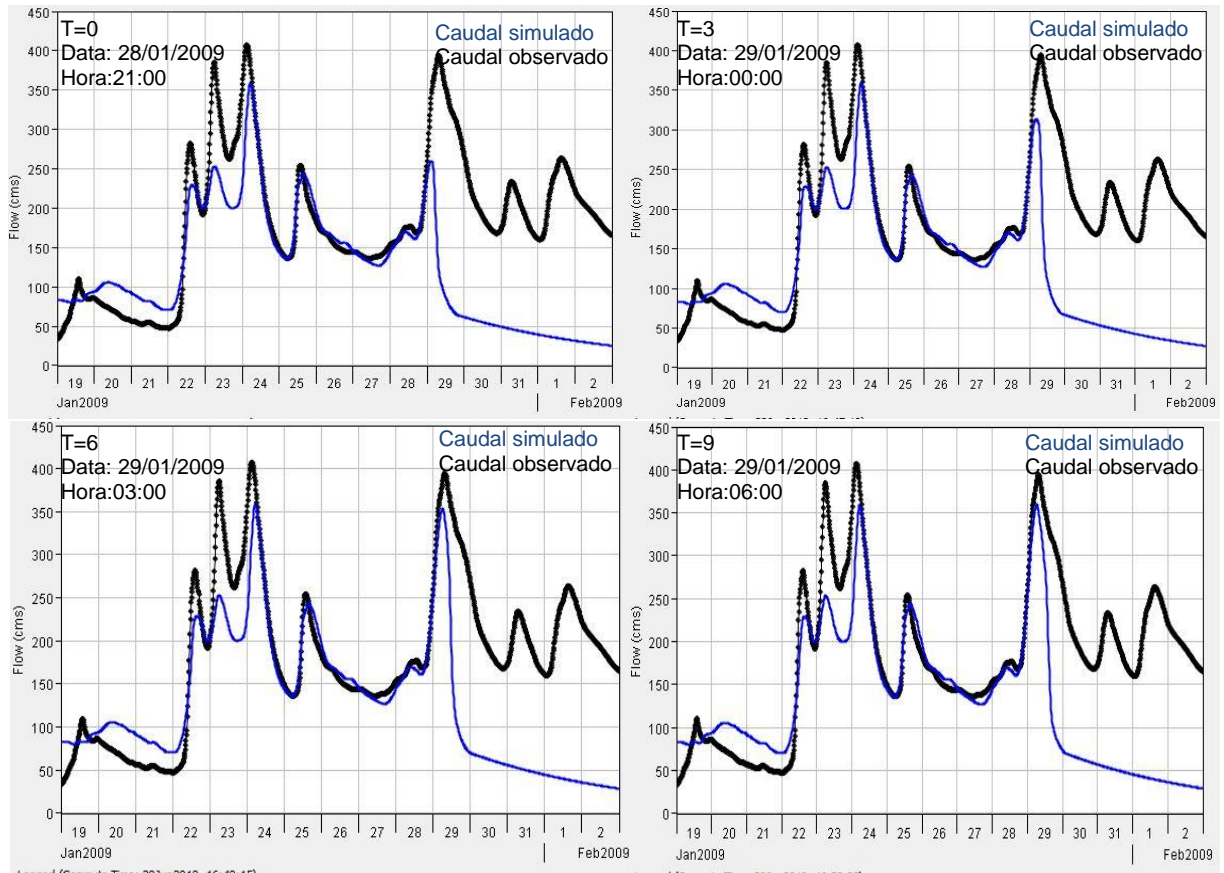


Figura D.14- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 19/01/2009 e 02/02/2009

iii. 30/01 a 11/02 do ano hidrológico 2008/2009

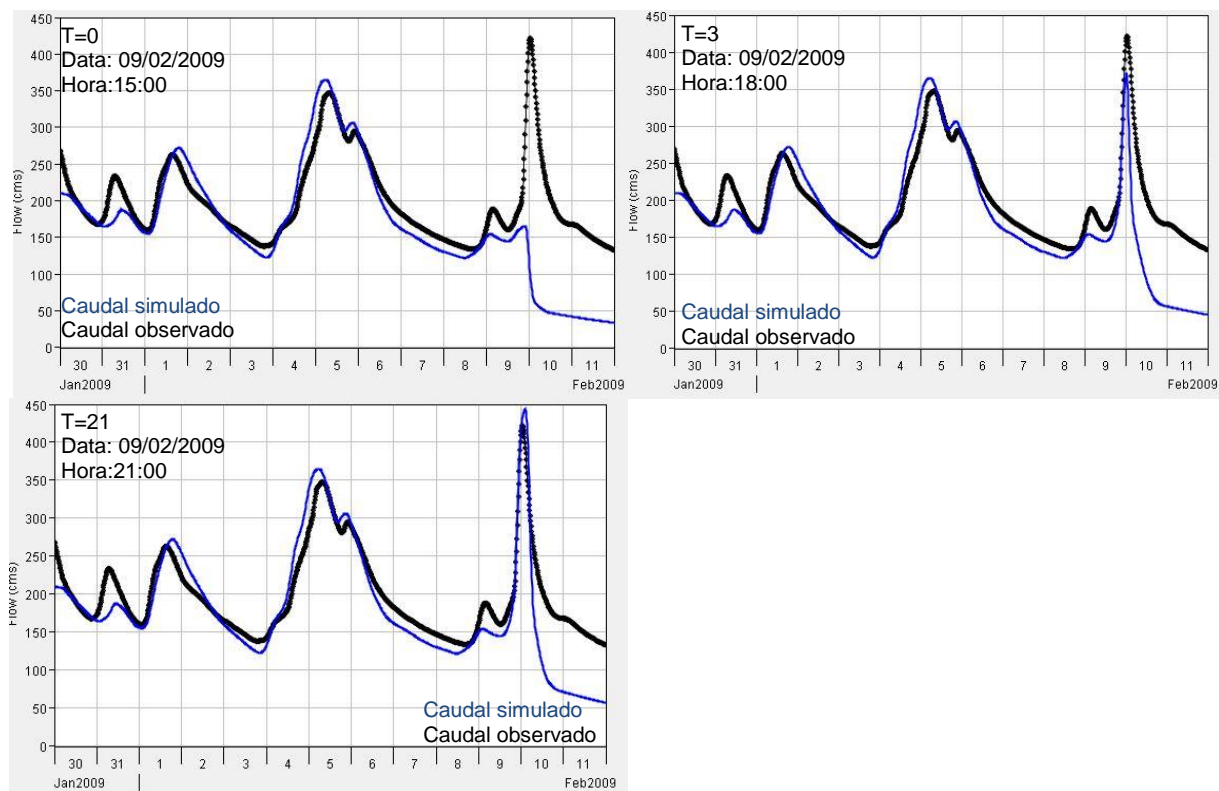


Figura D.15- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 30/01/2009 e 11/02/2009

D.2: SITUAÇÃO 2- 01/12 A 19/01 DO ANO HIDROLÓGICO 2009/2010

i. 01/12 a 09/12 do ano hidrológico 2009/2010

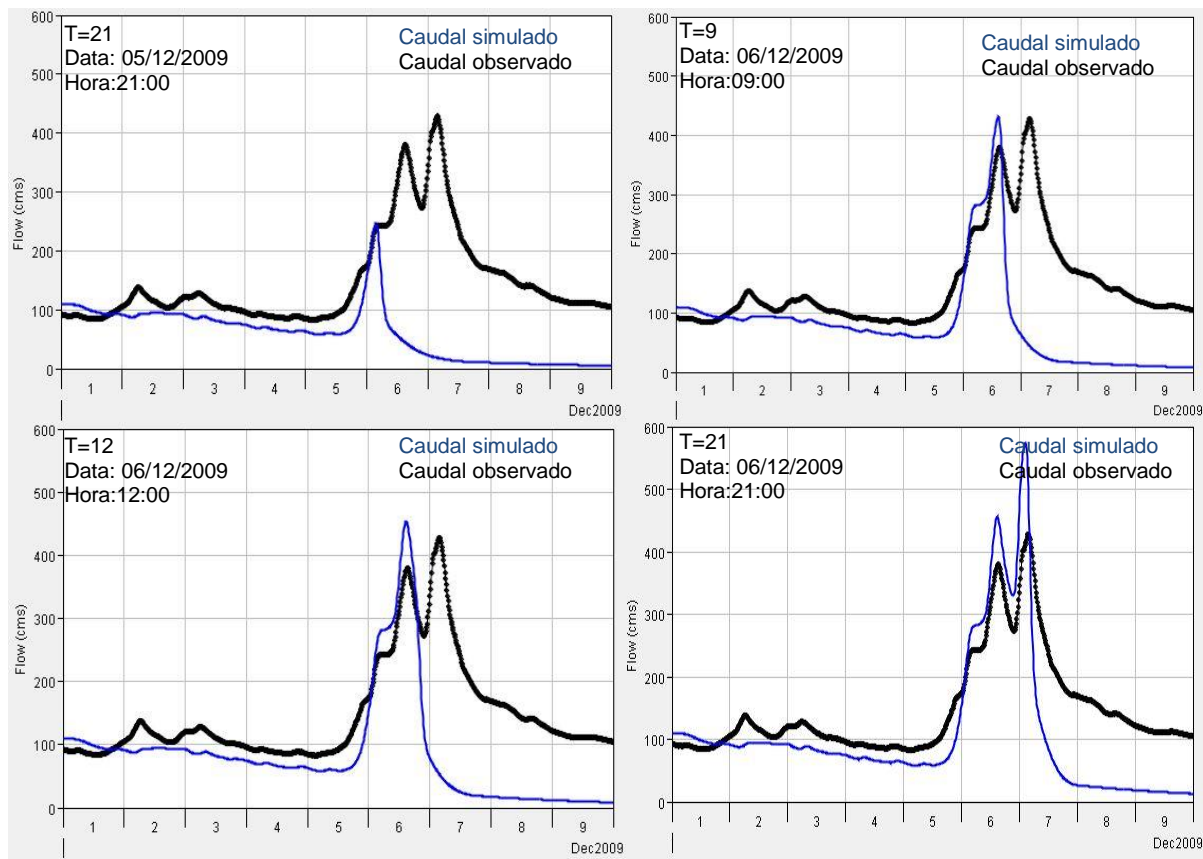


Figura D.16 - Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 01/12/2009 e 09/12/2009

ii. 12/12 a 26/12 do ano hidrológico 2009/2010

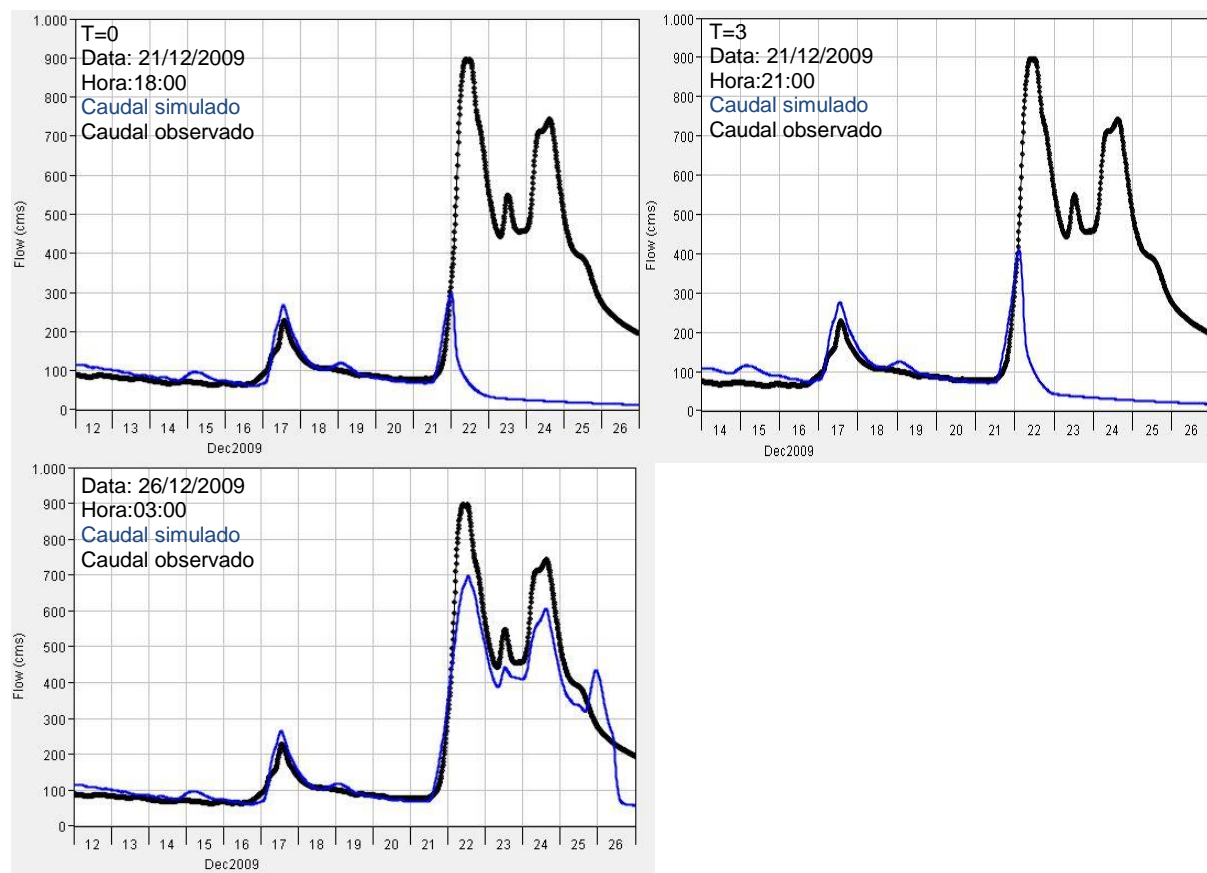


Figura D.17 - Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 12/12/2009 e 26/12/2009

iii. 18/12 a 04/01 do ano hidrológico 2009/2010

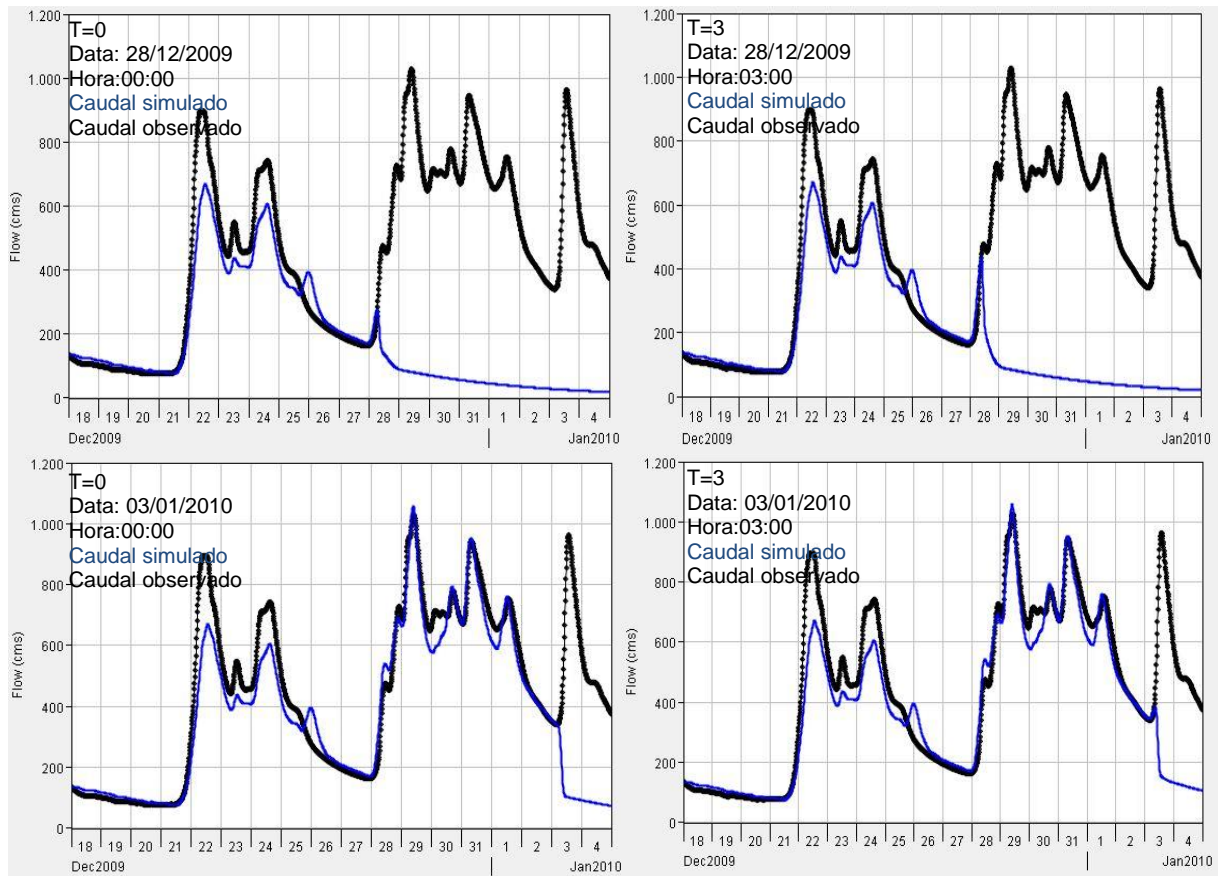


Figura D.18 - Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 18/12/2009 e 04/01/2010

iv. 02/01 a 19/01 do ano hidrológico 2009/2010

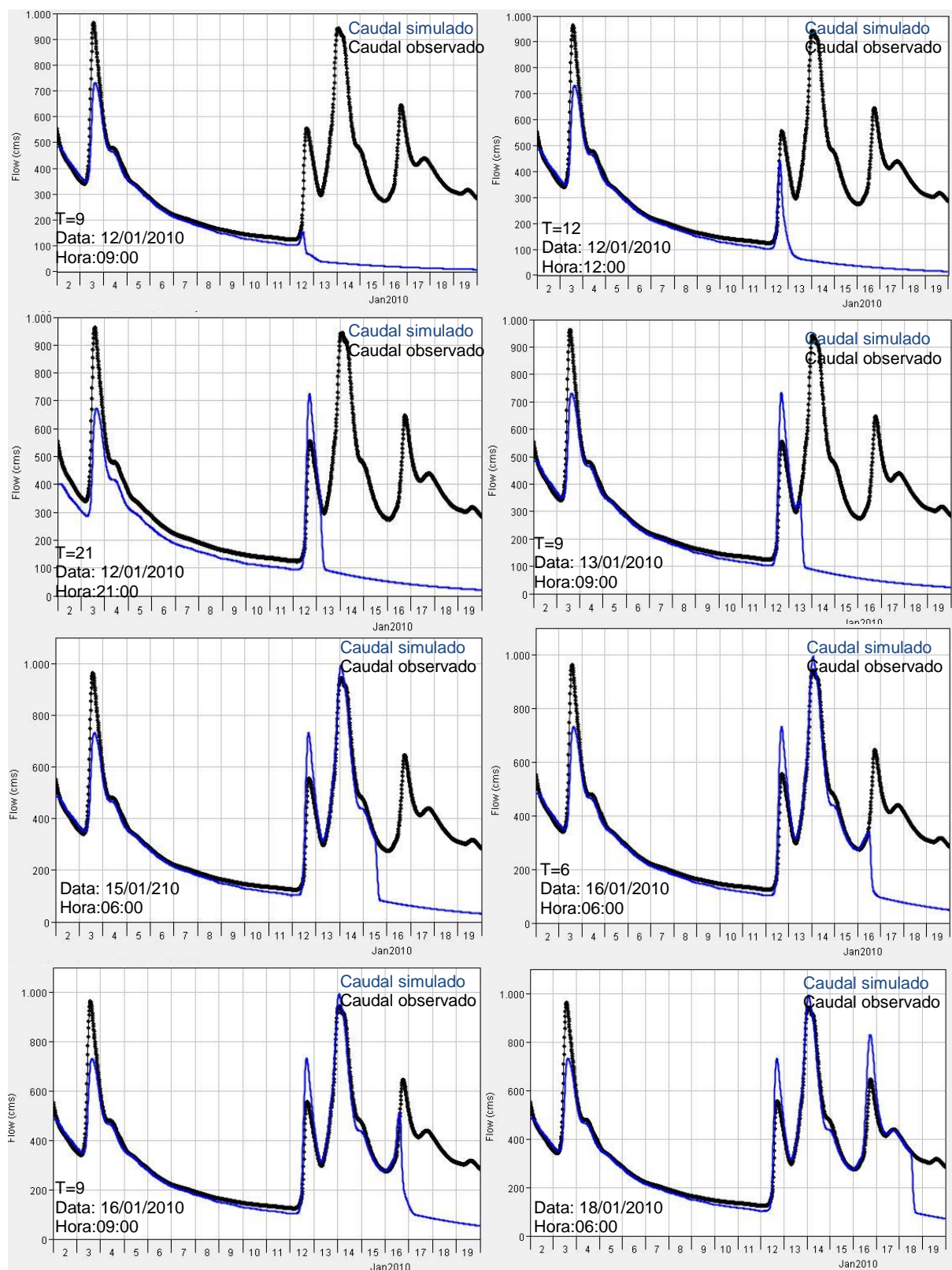


Figura D.19- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 02/01/2010 e 19/01/2010

D.3: SITUAÇÃO 6- 23/01 A 06/02 DO ANO HIDROLÓGICO 2016/2017

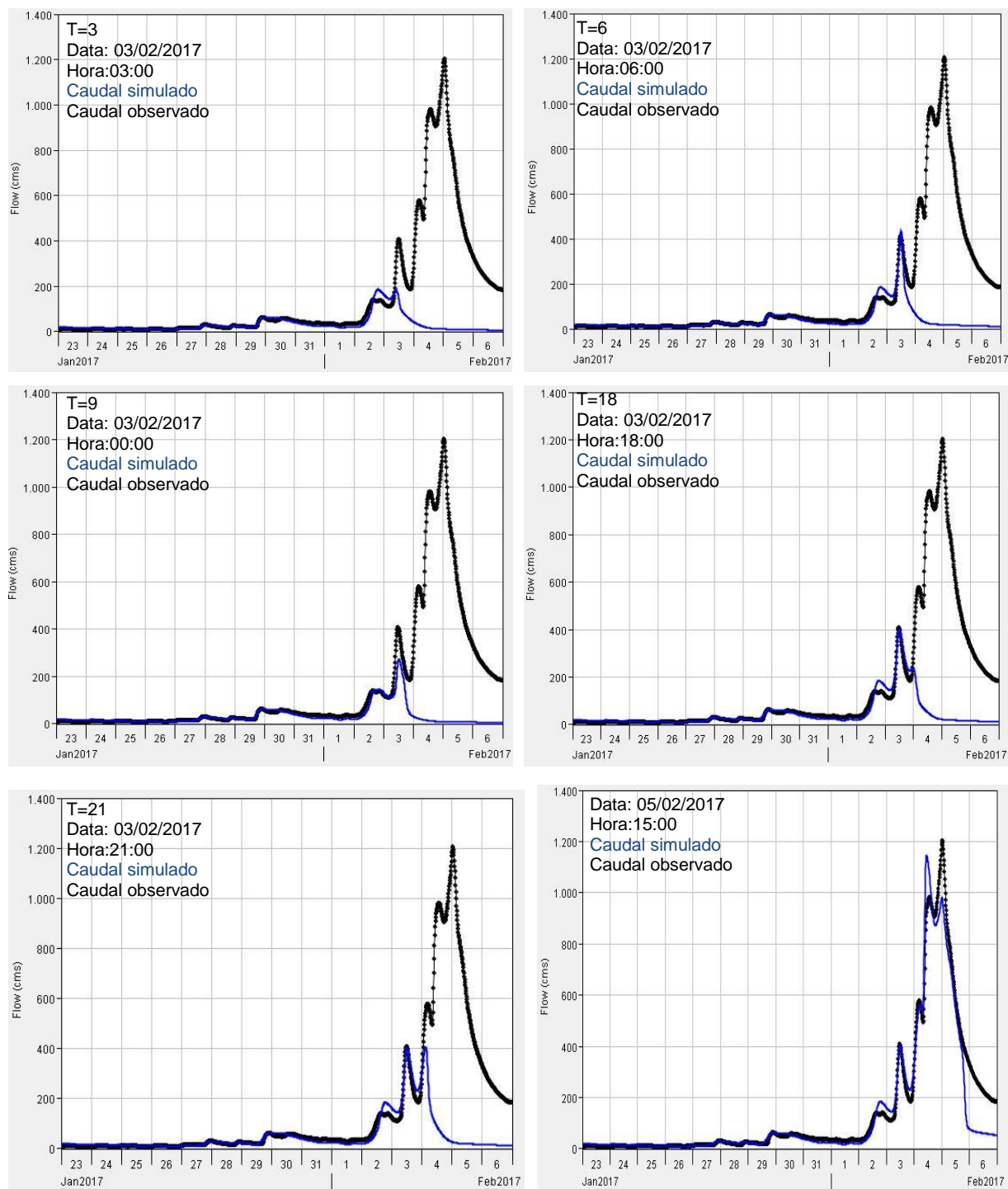


Figura D.20 - Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 23/01/2017 e 03/02/2017

D.4: SITUAÇÃO 3- 24/01 A 15/01 DO ANO HIDROLÓGICO 2015/2016

Neste anexo estão ilustradas as restantes simulações obtidas na definição do modelo de alerta de cheias para a situação 3 utilizando as estações pluviométricas de Ponte Cavez, Celorico de Basto e Lamas de Alvalá na caracterização do modelo meteorológico.

i. 24/12 a 05/01 do ano hidrológico 2015/2016

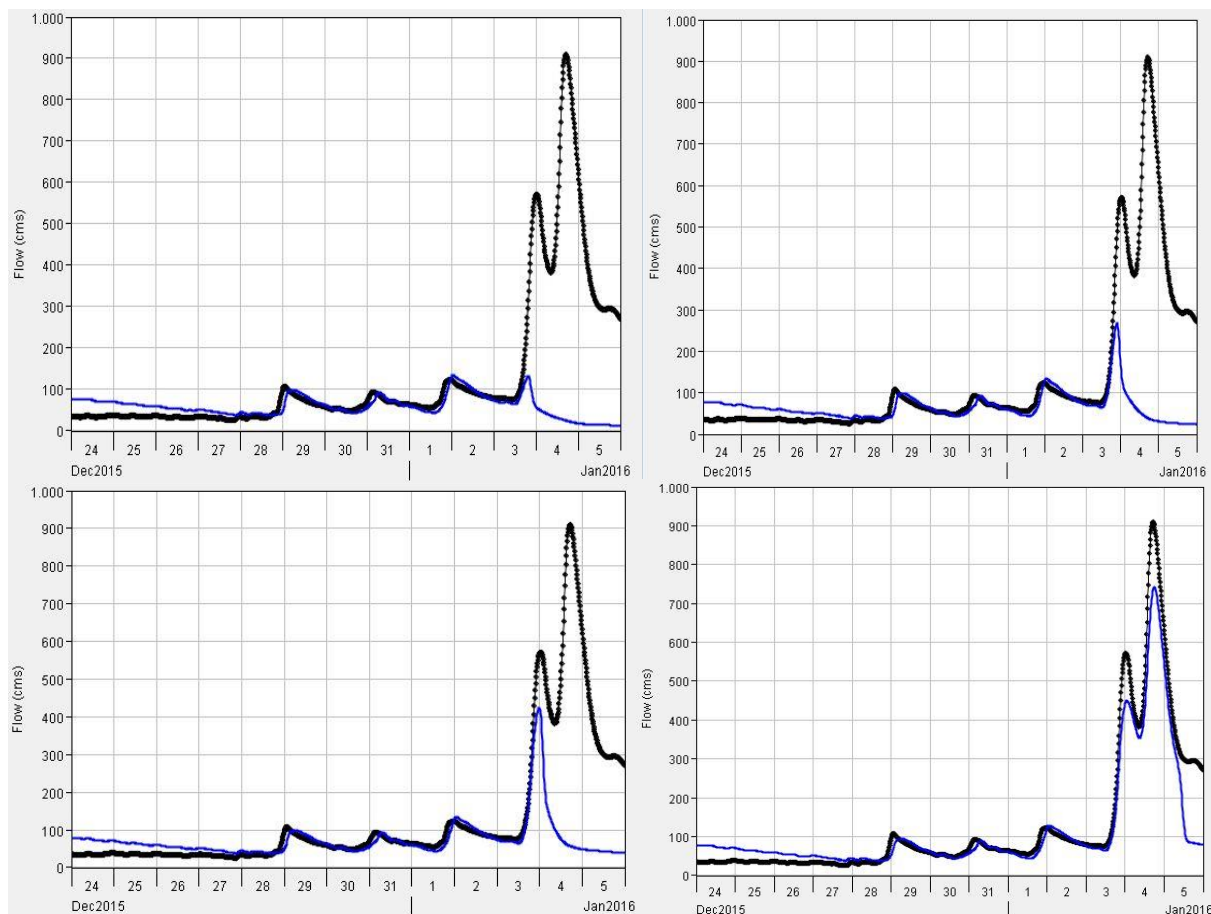


Figura D.21- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 24/12/2015 e 05/01/2016

ii. 30/12 a 09/01 do ano hidrológico 2015/2016

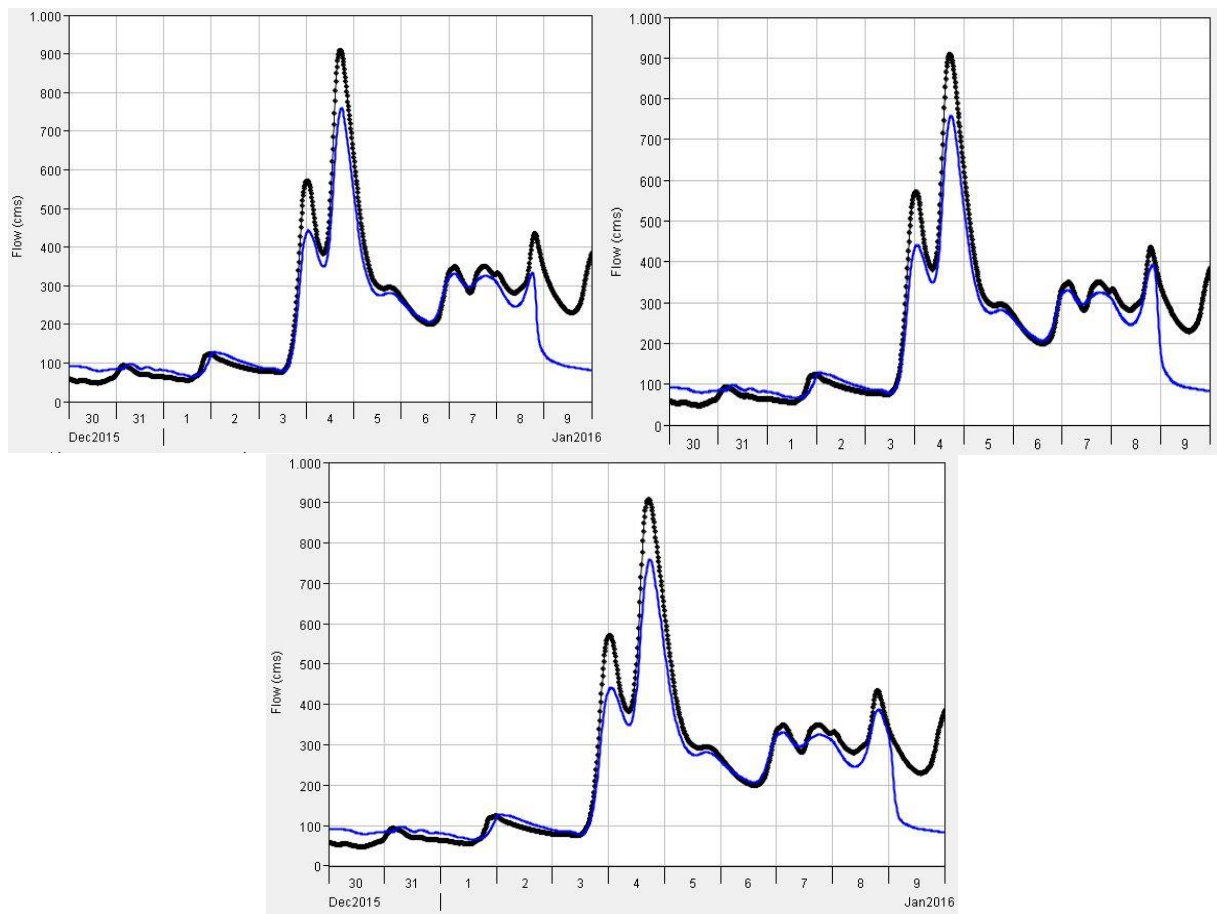


Figura D.22- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 30/12/2015 e 09/01/2016

iii. 31/12 a 15/01 do ano hidrológico 2015/2016

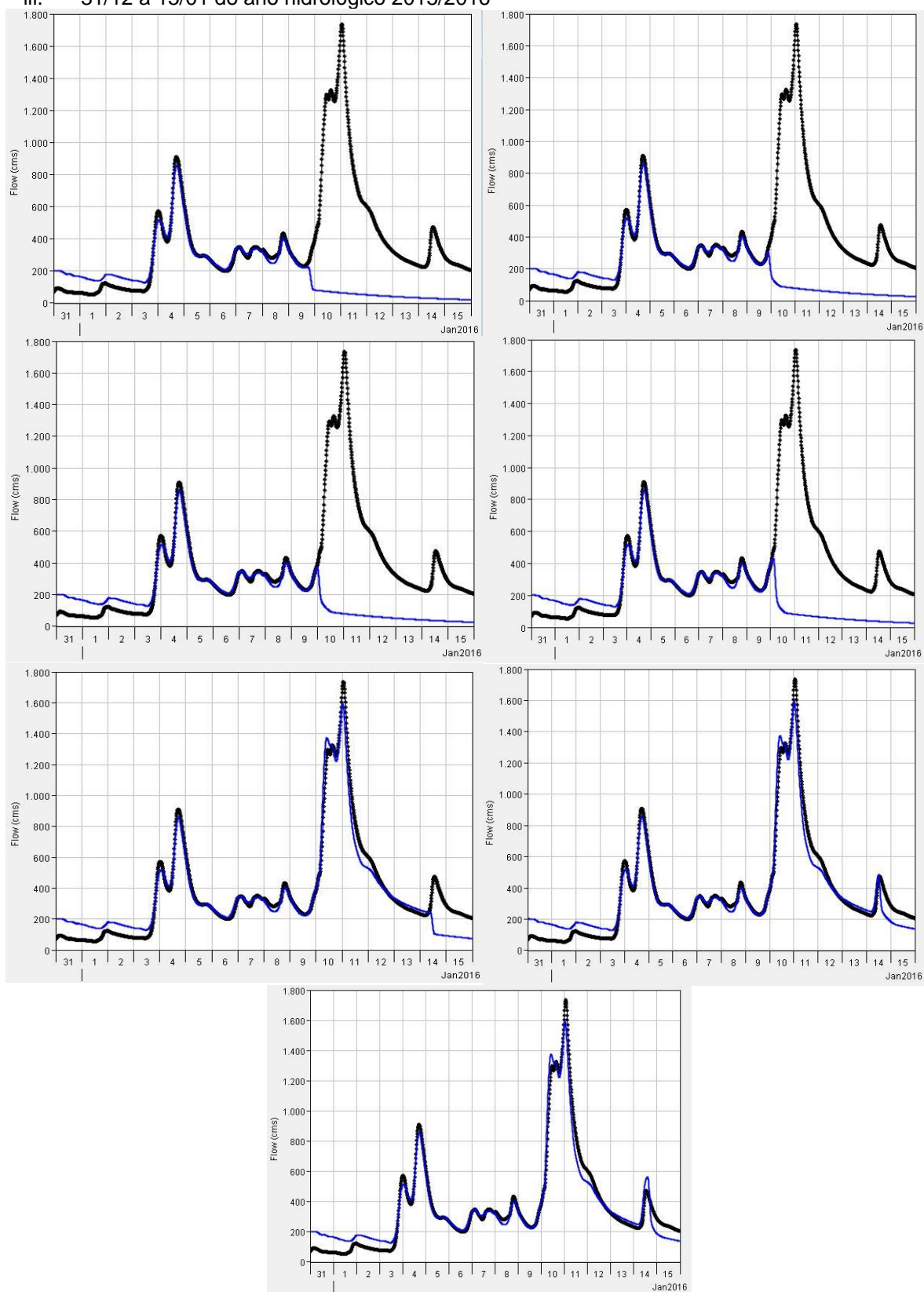


Figura D.23- Simulações realizadas para um passo temporal de 3h, para o período compreendido entre 31/12/2015 e 15/01/2016

